

Análise da qualidade de parafusos e porcas fabricados por Impressão 3D de baixo custo

Hugo Magalhães Semeão

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. Jorge Lino

Coorientador: PhD Leonardo Santana



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2019-julho-18

Ao meu avô, Augusto Rodrigues de Magalhães.

Resumo

Dado o atual crescimento e banalização das tecnologias de Fabrico Aditivo, nomeadamente a FDM, o surgimento no mercado de equipamentos de baixo custo possibilitou o acesso deste tipo de tecnologia a todo um novo segmento de utilizadores, cujo acesso seria incomportável num passado não muito distante. Neste contexto, torna-se de particular interesse o estudo de possíveis aplicações desta tecnologia. No presente estudo aborda-se a análise da qualidade de parafusos e porcas fabricados por impressão 3D de baixo custo.

O estudo foi dividido em três fases distintas. Na primeira fase foi determinado que a dimensão dos elementos a imprimir que melhor satisfazia as condições de tempo de processamento conjugadas com a resolução da peça obtida seria M10. Foram obtidos modelos CAD padronizados com a dimensão escolhida, sendo através desses modelos que foram fabricados os componentes em estudo.

Na segunda fase foram estudadas diferentes orientações de construção— vertical, horizontal e 45° em relação a Z. Dentre estas, a única que possibilitou a obtenção de parafusos funcionais foi a orientação de construção vertical, sendo a utilizada na última fase do estudo.

Na fase final foi analisada a influência dos parâmetros do processo em características dimensionais, de massa e mecânicas das peças obtidas. Por consulta de literatura específica da tecnologia FDM, foram selecionados quatro parâmetros para esta análise: espessura de camada, velocidade de deposição dos perímetros, número de perímetros e temperatura de extrusão.

Da análise dimensional dos parafusos concluiu-se que o único parâmetro que foi estatisticamente influente foi a espessura de camada, havendo uma aproximação do valor pretendido com a diminuição da mesma. No caso das porcas a espessura de camada e o número de perímetros foram considerados ambos significativos, verificando-se que com o aumento do número de perímetros e diminuição da espessura de camada as dimensões das porcas obtidas eram mais aproximadas às do modelo CAD.

Na análise mássica identificaram se para ambos os componentes que os parâmetros considerados relevantes foram a temperatura de extrusão e a espessura de camada.

Ao nível dos ensaios mecânicos nenhum dos parâmetros em estudo foi considerado influente, sendo a espessura de camada o que mais se aproximou de tal. Foram realizados um conjunto de ensaios à tração de provetes fabricados nas mesmas condições dos parafusos, tendo sido a influência dos parâmetros nos resultados obtidos também avaliada. Da análise aos valores de tensão aquando da rutura nenhum dos parâmetros em estudo foi considerado relevante. No que toca ao módulo de Young, o parâmetro que mais influenciou este valor foi a espessura de camada.

O estudo concluiu que o equipamento em questão apresentava capacidade para produzir este tipo de componentes. No entanto, certos fatores considerados limitadores poderiam ser ultrapassados através de modificações do equipamento utilizado.

Palavras-chave: Impressão 3D, Extrusão, Parafusos, Porcas, Ligações Aparafusadas

Quality evaluation of 3D printed fasteners in a low-cost equipment

Abstract

The Additive Manufacturing industry has seen quite a gain in popularity in the past few years, in particular the FDM technology. The commercialization of low-cost equipment proliferated the technology into new markets where the access to this technology would be unaffordable a few years ago. Within this context, is now quite relevant the study of possible applications of FDM, being in the current work evaluated the quality of 3D printed fasteners in a low-cost equipment.

The study was divided into three stages. In the first stage was evaluated the capability of the equipment of printing bolts and screws of different sizes. It was concluded that the more suited size for this study was a M10. Standardized CAD files with the elected size were used to proceed with the following stages.

The second stage consisted in a study of the possible build orientation. Three different orientations were studied — vertical, horizontal and at 45° angle with the Z axis. Within the studied orientations, the printer was only able to print functional elements in the vertical, being this orientation the selected one for the following studies.

In the final stage of the study a parameter influence analysis in the dimension, mass and mechanical properties of the printed components. The studied parameters were layer thickness, contour speed, number of contours and extrusion temperature.

The dimensional analysis of the screws concluded that the only statistically influent parameter was layer thickness, verifying that the smaller value of this parameter had a better dimensional accuracy. In the bolt analysis layer thickness and number of contours were the influent parameters and the condition that had dimensions closer to the target values had a small value of layer thickness and was built with 3 contours.

The mass analysis identified two influent parameters for both components, those being the extrusion temperature and layer thickness.

In the mechanical analysis a single lap bolted joint test was conducted, in order to analyze the parameters influence. In this study none of the selected parameters was statistically influent, being the layer thickness the parameters that most approach the limit value. A set of tensile tests was conducted in specimens build in the same conditions of the screws. Of that analysis was inferred that none of the studied parameters was influent in the ultimate tensile strength and layer thickness was significant in the Young's modulus value.

The study concluded that the equipment was able to produce these components with certain limitations. Those limitations could be overcome through some modifications of the printer.

Keywords: 3D Printing, Extrusion, Fasteners, Bolted Joints

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Lino, por me ter dado a oportunidade de realizar a dissertação neste tema e por toda a disponibilidade e apoio prestado ao longo deste trabalho.

Ao meu coorientador, Engenheiro Mestre Leonardo Santana, por toda a ajuda, disponibilidade, motivação, orientação e acima de tudo bons momentos que passei durante a realização deste trabalho.

Aos Engenheiros Mestres Edwin Ocaña, Bruno Areias, Marco Marques e André Brandão pela amizade, apoio e acolhimento no Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços.

A todos os colaboradores do INEGI e funcionários do DEMec que contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha família, que sempre me apoiou e me deu todas as condições necessárias ao longo de todo o meu percurso e aos quais devo tudo.

A todos os meus amigos, em especial aos *Clitos* e às *Tertúlias sobre o Tempo e Gelados*, por todas as demonstrações de amizade e entreaajuda ao longo desta caminhada e por terem feito destes 5 anos os melhores da minha vida.

Agradecimento ao financiamento do Projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



Se podes olhar, vê. Se podes ver, repara.

José Saramago

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e motivação da dissertação	1
1.2	Objetivos do trabalho	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Parafusos e Porcas.....	5
2.1.1	Dimensões	6
2.1.2	Esforços nas juntas aparafusadas.....	9
2.1.3	Método de fabrico convencionais.....	13
2.1.4	Materiais	16
2.2	Fabrico Aditivo	18
2.3	Fabrico Aditivo por Extrusão.....	21
2.3.1	Parâmetros do Processo	25
2.3.2	Características Dimensionais.....	31
2.3.3	Características Mecânicas.....	38
2.4	Fabrico Aditivo de Parafusos	45
3	Materiais e Métodos.....	47
3.1	Material.....	47
3.2	Software	49
3.2.1	<i>Meshmixer®</i>	49
3.2.2	<i>Slic3r Prusa Edition®</i>	51
3.3	Equipamento	53
3.3.1	Impressora 3D	53
3.3.2	Procedimento de Calibração	57
3.4	Metodologia experimental	59
3.4.1	Estudos Iniciais.....	60
3.4.2	Estudo da Orientação de Construção.....	62
3.4.3	Estudo da Influência de Parâmetros	64
4	Resultados.....	71
4.1	Estudos Iniciais	71
4.2	Orientação de construção	77
4.3	Estudo da Influência de Parâmetros.....	81
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	97
5.1	Conclusões	97
5.2	Trabalhos futuros	98
	Referências	100
	ANEXO A: Datasheet PLA	108
	ANEXO B: Imagens dos parafusos em diferentes orientações de construção	110
	ANEXO C: Provete	114
	ANEXO D: Resultados dos ensaios dos parafusos	116
	ANEXO E: Resultados dos ensaios à tração	120
	ANEXO F: Superfícies de fratura dos provetes	124
	ANEXO G: Dispositivo de ensaio ao desgaste	128

Índice de Figuras

Figura 1 - Dimensões presentes na norma ISO 4014 (ISO 2011).	7
Figura 2 - Dimensões presentes na norma ISO 4032 (ISO 1999).	8
Figura 3 – Esquema de uma junta tensionada (em cima) e junta ao corte (em baixo) (Bickford 2007).	9
Figura 4 - Esquema do pré-esforço numa junta aparafusada (Lee e Ho 2012).	10
Figura 5 - Diagrama da junta pré-esforçada (Bickford 2007).	10
Figura 6 - Distribuição das tensões num parafuso numa junta pré-esforçada (Yu e Zhou (2015)).	11
Figura 7 - Diagrama de uma junta pré-esforçada sujeita a um esforço de tração (Bickford 2007).	11
Figura 8 - Linhas de tensão e compressão numa junta aparafusada tensionada (Bickford 2007).	12
Figura 9 - Distribuição de tensões em juntas dependentes da resistência ao corte dos parafusos (Bickford 2007).	12
Figura 10 - Diferentes etapas no fabrico de um parafuso (Würth 2019).	13
Figura 11 - Obtenção da rosca no corpo do parafuso (Adaptado de Würth (2019)).	14
Figura 12 - Obtenção da rosca interna da porca (Würth 2019)	14
Figura 13 - Sequencia de torneamento de uma porca e parafuso (de cima para baixo) (Engineers 2008).	15
Figura 14 - Comparação dos materiais mais utilizados para a produção de parafusos e porcas (Granta 2018).	17
Figura 15 - Etapas do Fabrico Aditivo (Adaptado de Cotteleer, Holdowsky e Matho (2013)).	18
Figura 16 - Quota de mercado de FA por tecnologia (Wohlers 2019).	20
Figura 17 - Processo de FDM (ManufacturingGuide 2016).	21
Figura 18 - Ângulos de construção entre camadas.	22
Figura 19 - Exemplo de peça com estrutura de suporte (à esquerda) e peça com a estrutura de suporte removida (à direita) (Vanek, Galicia e Benes 2014).	23
Figura 20 – Equipamento FDM típico da Stratasys Ltd. (à esquerda) e exemplo de equipamento RepRap (à direita) (Gibson, Rosen e Stucker 2015).	24
Figura 21 - Orientação de construção vertical, paralela e horizontal (da esquerda para a direita) (Spišák, Gajdoš e Slota 2014).	25
Figura 22 - Variação da espessura de camada (Adaptado de Ayrilmis (2018)).	26
Figura 23 - Espaçamento entre filamentos de preenchimento de 0,127mm, 0,254mm e 0,381mm (da esquerda para a direita) (Adaptado de Spišák, Gajdoš e Slota (2014)).	26
Figura 24 - Representação do ângulo de preenchimento (Adaptado de Wu et al. (2015)).	27

Figura 25 - Variação da largura do filamento de contorno depositado (Adaptado de Ali, Chowdary e Maharaj (2014)).	27
Figura 26 - Variação do número de perímetros entre 1, 2 e 3 (da esquerda para a direita) (Spišák, Gajdoš e Slota 2014).	28
Figura 27 - Variação da densidade de preenchimento entre 10% (a), 20% (b) e 30% (c) (Luzanin et al. 2017).	29
Figura 28 - Padrões de preenchimento (Akhoundi e Behravesht 2019).	30
Figura 29 - Análise da rugosidade, utilizando um diâmetro do bico extrusor de 0,4mm, temperatura de extrusão de 400°C, velocidade de preenchimento de 20mm/s e espessura de camada de 0,1 mm (a) e 0,25 mm (b) (Adaptado de Wang et al. (2019)).	34
Figura 30 - Análise da rugosidade da superfície na direção vertical, utilizando um diâmetro do bico extrusor de 0,4mm com uma velocidade de preenchimento de 17mm/s (a), 20mm/s (b) e 26 mm/s (c) (Adaptado de Wang et al. (2019)).	34
Figura 31 - Variações dimensionais com a condição com 100% de percentagem de preenchimento (a) e com multiplicador de extrusão igual a 0,5 (b) (Adaptado de Santana, Lino Alves e da Costa Sabino Netto (2017)).	37
Figura 32 - Exemplo de provete submetido a ensaio à tração (a), imagem de microscopia ótica da zona fraturada (b) e imagem de microscopia da camada fraturada (c) (Samykan et al. 2019).	40
Figura 33 - Imagens de microscopia eletrônica da fratura dos provetes impressos com a condição 1, lateral (a) e frontal (b), e com a condição 2, lateral (c) e frontal (d) (Deng et al. 2018).	41
Figura 34 - Imagem de microscopia eletrônica da zona de fratura de provetes impressos com espessura de camada de 0,06mm e velocidade de preenchimento de 20 mm/s, na orientação vertical (a), paralela (b) e horizontal (c) (Chacón et al. 2017).	43
Figura 35 - Exemplo de UEF fabricado por FA (Adaptado de Oldakowski et al. (2016)).	45
Figura 36 – Filamento de PLA utilizado no estudo.	48
Figura 37 - Interface do software Meshmixer®.	49
Figura 38 - Geração de suporte num provete ISO 527 no Meshmixer®.	50
Figura 39 - Interface do software Slic3r Prusa Edition®.	51
Figura 40 - Pré-visualização do modelo fatiado no software Slic3r.	52
Figura 41 - Pré-visualização por camadas fatiadas no software Slic3r.	52
Figura 42 - Impressora 3D utilizada neste trabalho.	53
Figura 43 - Componente para o guiamento do filamento.	54
Figura 44 - Componente para o sistema de alimentação.	55
Figura 45 - Cobertura da ventoinha.	55
Figura 46 - Vidro para a plataforma de construção.	56
Figura 47 - Interface do software Pronterface.	57

Figura 48 - Exemplo de peça de teste impressa no equipamento.	58
Figura 49 - Diagrama do processo experimental.	59
Figura 50 - Diferentes parafusos impressos no estudo inicial.	60
Figura 51 – Lupa estereoscópica utilizada nas observações macroscópicas.	61
Figura 52 - Pré-visualização do parafuso impresso na horizontal com estrutura de suporte.	62
Figura 53 - Pré-visualização do parafuso impresso a 45° do eixo Z com estrutura de suporte.	62
Figura 54 - Pré-visualização do parafuso impresso verticalmente.	63
Figura 55 - Medições efetuadas ao longo do parafuso.	65
Figura 56 - Balança eletrônica utilizada na medição de massa dos componentes.	66
Figura 57 - Junta simples aparafusada (Adaptado de McCarthy et al. (2002)).	67
Figura 58 - Anilha de silicone utilizado na fixação do parafuso.	68
Figura 59 – Dispositivo de ensaio colocado na máquina de ensaios.	68
Figura 60 - Máquina de ensaios utilizada.	68
Figura 61 - Provete de tração ISO 527 impresso na orientação vertical.	69
Figura 62 - Rosca do parafuso M3.	71
Figura 63 - Rosca do parafuso M4.	72
Figura 64 - Rosca do parafuso M5.	72
Figura 65 - Rosca do parafuso M6.	73
Figura 66 - Rosca do parafuso M10.	73
Figura 67 – Efeito da compressão no filamento depositado ao nível dos furos (adaptado de Redwood, Schffer e Garret (2017))	75
Figura 68 - Análise da dimensão do diâmetro da rosca no Meshmixer®.	76
Figura 69 - Análise da dimensão da porca no Meshmixer®.	76
Figura 70 - Parafusos impressos na orientação vertical (a), inclinado 45° em relação a Z (b) e horizontal (c).	77
Figura 71 - Vista lateral da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação de 45° em relação ao eixo Z.	78
Figura 72 - Vista lateral da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação horizontal.	78
Figura 73 - Vista lateral da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação vertical.	78
Figura 74 - Direção de solicitação e orientação das camadas (adaptado de Redwood, Schffer e Garret (2017)).	80
Figura 75 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros no diâmetro dos parafusos.	82
Figura 76 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros no diâmetro das porcas.	84

Figura 77 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros na massa dos parafusos.	86
Figura 78 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros na massa das porcas.	88
Figura 79 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros nos resultados dos ensaios mecânicos.	89
Figura 80 - Gráfico Força/Deslocamento dos ensaios com maior resistência mecânica de cada condição	90
Figura 81 - Curva tensão/deformação do provete da condição 5.	92
Figura 82 - Superfície de fratura do provete da condição 5.	92
Figura 83 - Representação da influência dos níveis dos parâmetros nos valores de tensão de ruptura obtidos nos ensaios à tração dos provetes.	94
Figura 84 - Representação da influência dos níveis dos parâmetros nos valores de módulo de Young obtidos nos ensaios à tração dos provetes (Valor teórico 3,6 GPa).	95
Figura 85 - Mecanismo de ensaio ao desgaste.	99
Figura 86 - Vista frontal da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação de 45° em relação ao eixo Z.	110
Figura 87 - Vista frontal da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação horizontal.....	110
Figura 88 - Vista frontal da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação vertical.....	110
Figura 89 - Vista total frontal do parafuso impresso com a orientação de 45° em relação ao eixo Z.	111
Figura 90 - Vista total lateral do parafuso impresso com a orientação de 45° em relação ao eixo Z.	111
Figura 91 - Vista total frontal do parafuso impresso com a orientação horizontal.	111
Figura 92 - Vista total lateral do parafuso impresso com a orientação horizontal.	112
Figura 93 - Vista total frontal do parafuso impresso com a orientação vertical.....	112
Figura 94 - Vista total lateral do parafuso impresso com a orientação vertical.	112
Figura 95 - Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 1.	116
Figura 96- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 2.	116
Figura 97- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 3.	117
Figura 98- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 4.	117
Figura 99- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 5.	118
Figura 100- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 6.	118
Figura 101- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 7.	119
Figura 102- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 8.	119
Figura 103 - Ensaio à tração do provete da condição 1	120
Figura 104 - Ensaio à tração do provete da condição 2.....	120

Figura 105 - Ensaio à tração do provete da condição 3.....	121
Figura 106 - Ensaio à tração do provete da condição 4.....	121
Figura 107 - Ensaio à tração do provete da condição 5.....	122
Figura 108 - Ensaio à tração do provete da condição 6.....	122
Figura 109 - Ensaio à tração do provete da condição 7.....	123
Figura 110 - Ensaio à tração do provete da condição 8.....	123
Figura 111 - Superfície de fratura do provete da condição 1.	124
Figura 112- Superfície de fratura do provete da condição 2.	124
Figura 113- Superfície de fratura do provete da condição 3.	125
Figura 114- Superfície de fratura do provete da condição 4.	125
Figura 115- Superfície de fratura do provete da condição 5.	126
Figura 116- Superfície de fratura do provete da condição 6.	126
Figura 117- Superfície de fratura do provete da condição 7.	127
Figura 118- Superfície de fratura do provete da condição 8.	127

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades mecânicas das classes de aços utilizados em parafusos e porcas (Adaptado de ISO 898-1)	16
Tabela 2 - Classificação das tecnologias FA (Adaptado de Volpato et al. (2017)).....	19
Tabela 3 - Artigos que analisam características dimensionais.	31
Tabela 4 – Artigos que analisam características mecânicas.	38
Tabela 5 - Propriedades do PLA RepRap.pt.....	47
Tabela 6 - Principais características do equipamento utilizado.....	53
Tabela 7 - Parâmetros do processo avaliados e níveis atribuídos.....	64
Tabela 8 - Matriz ortogonal de Taguchi, do tipo L8, com as diferentes combinações de parâmetros.	64
Tabela 9 - Restantes parâmetros de impressão	65
Tabela 10 - Valores médios da análise dimensional dos parafusos.....	81
Tabela 11 - Resultados da ANOVA dos valores da análise dimensional dos parafusos.	81
Tabela 12 - Valores médios da análise dimensional das porcas.....	83
Tabela 13 - Resultados da ANOVA dos valores da análise dimensional das porcas.	83
Tabela 14 – Valores da análise mássica dos parafusos.	85
Tabela 15 - Resultados da ANOVA dos valores da análise mássica dos parafusos.....	85
Tabela 16 - Valores da análise mássica das porcas.	87
Tabela 17 - Resultados da ANOVA dos valores da análise mássica das porcas.....	87
Tabela 18 - Valores máximos das forças suportadas pelos parafusos nos diferentes ensaios.....	88
Tabela 19 - Resultado da ANOVA da análise dos resultados dos ensaios mecânicos.	89
Tabela 20 - Valores de tensão de rutura e módulo de Young obtidos pelos ensaios de tração dos provetes.	93
Tabela 21 - Resultado da ANOVA da análise dos resultados dos valores de tensão de rutura obtidos pelos ensaios à tração dos provetes.....	93
Tabela 22 - Resultado da ANOVA da análise dos resultados dos valores de Módulo de Young obtidos pelos ensaios à tração dos provetes.	94

Lista de Siglas

3D — Tridimensional
ABS — Acrilonitrila Butadieno Estireno
AMF — *Additive Manufacturing Format*
ANOVA — Análise de Variância
ASA — Acrilonitrilo Estireno Acrilato
ASTM — *American Society for Testing and Materials*
CAD — *Computer Aided Design*
CJP — *ColorJet Printing*
CLIP — *Continuous Liquid Interface Production*
DEMec — Departamento de Engenharia Mecânica
DIN — *Deutsches Institut für Normung*
DMD — *Direct Metal Deposition*
DMLS — *Direct Metal Laser Sintering*
EpC — Espessura de Camada
FA — Fabrico Aditivo
FDM — *Fused Deposition Modeling* (Modulação por Extrusão de Plástico)
FEUP — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
ISO — *International Organization for Standardization*
LDPS — Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços
LENS — *Laser Engineered Net Shaping*
LET — Laboratório de Ensaios Tecnológicos
LOM — *Laminated Object Manufacturing*
MJP — *MultiJet printing*
NdP — Número de Perímetros
Nylon — Poliamida
PC — Policarbonato
PEEK — Poli(éter-éter-cetona)
PLA — Ácido Polilático
PPSF/PPSU — Polissulfona
PVA — *Poly(vinyl acetate)*
SDL — *Selective Deposition Lamination*
SL — *Stereolithography*
SLM — *Selective Laser Melting*
SLS — *Selective Laser Sintering*
STL — *Stereolithography*
TeE — Temperatura de Extrusão
TPU — Poliuretano Termoplástico
UEF — *Unthreaded Expandable Fasteners*
ULTEM — Polietirimida
VeP — Velocidade de Deposição dos Perímetros

Lista de Símbolos

(b)	— Comprimento da rosca
\bar{X}	— Média
σ_p	— Desvio padrão
c	— Altura da face da anilha
d, D	— Diâmetro nominal da rosca
d_a	— Diâmetro de transição
d_s	— Diâmetro do corpo não roscado
d_w	— Diâmetro da superfície de contacto
e	— Largura entre cantos
F_M, F_P	— Força de pré-esforço
k	— Altura da cabeça
k_w, m_w	— Altura de torção
l	— Comprimento nominal
l_g	— Distância da última rosca completa à superfície de contacto
l_s	— Comprimento do corpo não roscado
L_x	— Esforço externo
m	— Altura da porca
M_A	— Momento de aperto no parafuso
M_G	— Momento de aperto na porca
M_K	— Momento de resistência ao aperto
r	— Raio de curvatura
s	— Largura entre superfícies
ΔF_B	— Variação de esforço no parafuso
ΔF_J	— Variação de esforço na junta
ΔL	— Alongamento do parafuso
ΔT	— Compressão dos elementos a unir
φ	— Ângulo de construção

1 Introdução

1.1 Enquadramento e motivação da dissertação

Motivado pela expiração das patentes do processo FDM (Modelação por Extrusão de Plástico) e pelo surgimento de movimentos de código aberto, a Impressão 3D por extrusão tem verificado um crescimento significativo ao longo dos últimos anos, quando comparado com outros processos de Fabrico Aditivo (FA). Este crescimento pode ser explicado por dois fatores importantes (Roberson, Espalin e Wicker 2013):

- (i) A redução do preço de equipamentos de FDM, que atualmente podem ser adquiridos por valores em torno dos 180 euros;
- (ii) Simplicidade que caracteriza o próprio método, seja em termos de operação ou de disponibilidade de materiais.

Neste contexto, surgiu a oportunidade para o utilizador particular e para as pequenas empresas de ter à sua disposição tecnologias de FA, cujo acesso seria considerado inoportável num passado não muito distante. Tais facilidades capacitaram estes utilizadores para tirarem partido das vantagens associadas ao FA, tais como (Volpato et al. 2017):

- (i) Grande liberdade geométrica na fabricação e uma certa independência da complexidade da peça;
- (ii) Pouco desperdício de material e utilização eficiente de energia;
- (iii) Não requer dispositivos de fixação;
- (iv) Não é necessário trocar de ferramentas durante o processo de impressão;
- (v) O componente é fabricado num único equipamento e numa única etapa;
- (vi) Não são necessários cálculos complexos de trajetórias de ferramentas;
- (vii) Rapidez na obtenção de baixa quantidade de componentes quando comparados aos processos tradicionais.

No entanto, os processos de FA apresentam certas restrições como processo de fabrico, das quais se destacam (Volpato et al. 2017):

- (i) Em geral, as propriedades dos materiais obtidos por FA não são as mesmas dos materiais processados de forma tradicional;
- (ii) A precisão e o acabamento superficial são inferiores aos das peças obtidas por processos convencionais;
- (iii) Podem ocorrer problemas relacionados com distorções e empenamentos das peças obtidas;
- (iv) Quando utilizado no fabrico de grandes lotes, o FA é consideravelmente mais lento e dispendioso comparativamente com os processos convencionais.

Em diversos setores o FA já se encontra bastante difundido, dos quais são exemplo as indústrias aeroespacial, automóvel, bioengenharia (medicina e ortodontia), produtos elétricos e nos setores da joalheria, artes, engenharia civil, arquitetura, entre outros.

Dentro do FA, o FDM, pelas razões anteriormente elencadas, está a difundir-se para novos mercados, sendo atualmente o processo mais utilizado (Wohlers 2019). Como tal, o estudo de possíveis aplicações onde a utilização desta tecnologia pode ser vista como uma mais valia é de enorme interesse.

No presente trabalho é estudada a qualidade de parafusos e porcas impressas por FDM, elementos cujo método de fabrico convencional não inclui tecnologias de FA. A implementação deste método de fabrico seria teoricamente oportuna, tirando partido das vantagens associadas a este tipo de processos de fabrico, podendo desta forma ligar diferentes componentes.

1.2 Objetivos do trabalho

O principal objetivo deste trabalho passou pela avaliação da capacidade de uma impressora 3D de baixo custo para a impressão de parafusos e porcas.

Tal avaliação teve em conta três fatores:

- (1) Dimensão do modelo;
- (2) Estratégia de construção;
- (3) Influência dos parâmetros.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente documento encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo constituído por três partes principais: a revisão bibliográfica, os materiais e métodos e os resultados experimentais. Por fim são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

No Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica é feita uma introdução teórica sobre parafusos e porcas. Esta aborda as suas características dimensionais, métodos de fabrico convencionais, materiais utilizados e tipos de esforços aos quais os elementos estão sujeitos. Apresenta-se ainda uma introdução aos processos de FA, com foco especial na tecnologia FDM, sendo aprofundado o processo e os parâmetros caracterizadores do mesmo. Por fim são abordados diversos exemplos de tecnologias de fabrico aditivo aplicadas à produção de componentes de fixação.

Seguidamente é apresentado o Capítulo 3 – Materiais e Métodos onde é descrita a metodologia adotada no procedimento experimental do trabalho e o material e equipamentos utilizados ao longo do mesmo. São explicitadas as diferentes fases do trabalho e delimitados os objetivos específicos de cada uma.

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados no Capítulo 4 – Resultados, estando este subdivididos pelas diferentes fases definidas no capítulo anterior. É também apresentada uma discussão dos resultados, comparando estes com os efeitos expectáveis, por análise da literatura apresentada no Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, bem como justificações para tais resultados.

Por fim, no Capítulo 5 – Conclusões são apresentadas as conclusões resultantes da análise dos resultados experimentais e recomendadas diversas propostas de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Parafusos e Porcas

O parafuso de rosca helicoidal é inquestionavelmente uma das invenções mecânicas mais importantes. Estes podem ser encontrados a realizar funções de transmissão de potência, sendo neste caso utilizados para transformar movimentação linear em angular, podendo também ser encontrados como elementos fixadores de juntas não permanentes (Shigley, Mischke e Budynas 2008).

A ligação aparafusada clássica é formada por dois ou mais elementos que são unidos por fricção do parafuso com os próprios elementos a serem unidos, ou através de um sistema porca/parafuso. O binário de aperto aplicado no parafuso gera um pré-esforço responsável pela manutenção dos componentes a unir, criando uma ligação por atrito entre todos os componentes (Böllhoff 2007).

Numa ligação aparafusada bem dimensionada, o pré-esforço do parafuso é suficiente para garantir que não exista movimentação relativa das diferentes partes unidas. A determinação do pré-esforço ao qual a ligação deve ser submetida deve ser calculada tendo em conta os requisitos aos quais a ligação deve corresponder, sendo função da fricção na superfície de contacto, força de vedação expectável da ligação e esforços de tração aos quais a junta pode ser sujeita. No entanto, a força resultante do binário de aperto não deve ser demasiado elevada uma vez que pode levar à danificação dos elementos envolvidos na ligação (Kamax 2015).

O correto dimensionamento da junta é dependente de uma série de componentes, dos quais são exemplo: o posicionamento dos parafusos, o método de montagem, entre outros. No entanto, o elemento cujo dimensionamento é de maior importância é o próprio parafuso. Estes são fabricados numa grande variedade de materiais, tamanhos e normas, sendo função do utilizador determinar a conjugação destes fatores que mais se adequa ao efeito desejado (Böllhoff 2007).

2.1.1 Dimensões

Tanto as porcas como os parafusos seguem um conjunto de normas que definem a sua forma, tipo, dimensões, tolerâncias e propriedades mecânicas (Böllhoff 2007). Um exemplo de uma designação de um parafuso é seguidamente apresentado:

$$\underbrace{ISO\ 4014}_{(1)} - \underbrace{M\ 12 \times 50}_{(2)} - \underbrace{8.8}_{(3)}$$

A designação acima apresentada inclui todos os detalhes relevantes para o componente em questão. Na parcela (1) é apresentada a norma do parafuso que no exemplo indicado se trata da norma DIN EN ISO 4014. Esta norma é referente aos parafusos de cabeça hexagonal, encontrando-se neste documento informações relativas aos diferentes diâmetros nominais disponíveis, passos de rosca utilizados, altura de cabeça, comprimentos de rosca, entre outras. De notar que todos estes valores são dependentes do diâmetro nominal do parafuso, sendo a informação disponibilizada unicamente pela parcela (1) insuficiente para a definição total do parafuso. Na parcela (2) primeiramente encontra-se a letra M, indicativa que a rosca do elemento se trata de uma rosca métrica. Posteriormente é apresentado o diâmetro nominal do componente, tratando-se no caso apresentado de valor 12mm, e o comprimento do mesmo, de 50mm. Por fim encontra-se a parcela (3), sendo esta referente à classe do material utilizado na fabricação do parafuso. Os materiais mais utilizados no fabrico de parafusos e porcas são abordados com maior profundidade na secção 2.1.4-Materiais. Com a referencia previamente apresentada é possível definir todas as dimensões associadas ao parafuso (Böllhoff 2007).

Na Figura 1 é possível encontrar as diferentes dimensões que caracterizam um parafuso, sendo função do diâmetro nominal do parafuso e da norma escolhida. De notar que a norma DIN EN ISO 4014 não é a única norma existente para parafusos, havendo um vasto conjunto de normas que determinam o dimensionamento de diversos tipos de parafusos (Simões Morais 2012).

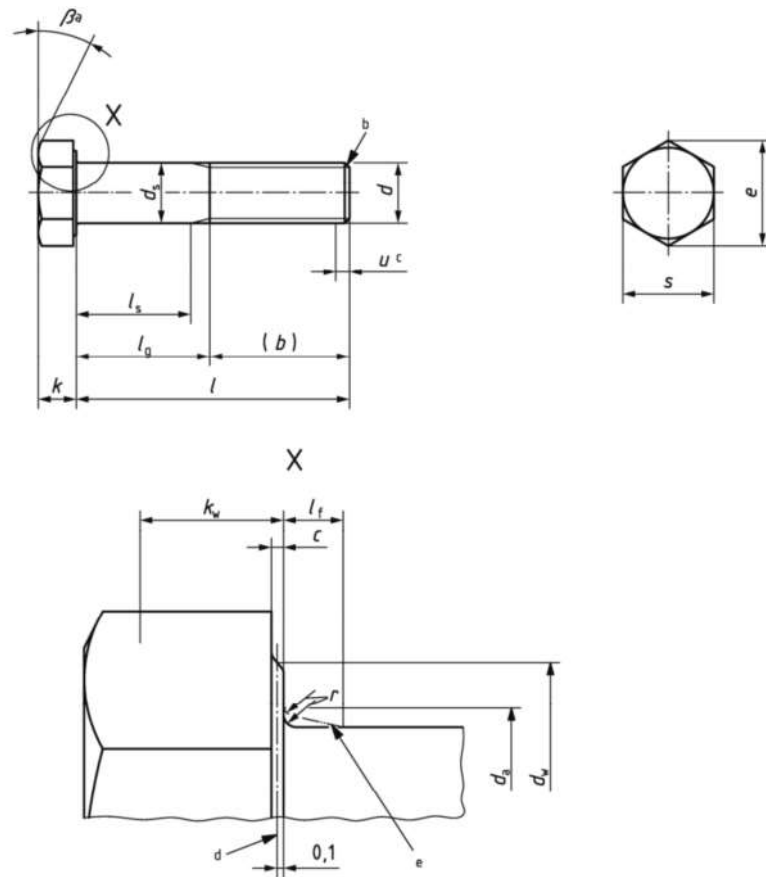


Figura 1 - Dimensões presentes na norma ISO 4014 (ISO 2011).

Na Figura 1 é possível observar diferentes siglas, sendo cada uma delas referentes a uma dimensão específica do parafuso. Os valores destas dimensões podem ser encontrados na respectiva norma, sendo função do diâmetro nominal do parafuso. As letras apresentadas fazem referência às seguintes dimensões (Böllhoff 2007):

(b)	Comprimento da rosca
c	Altura da face da anilha
d	Diâmetro nominal da rosca
d_a	Diâmetro de transição
d_s	Diâmetro do corpo não roscado
d_w	Diâmetro da superfície de contacto
e	Largura entre cantos
k	Altura da cabeça
k_w	Altura de torção
l	Comprimento nominal
l_g	Distância da última rosca completa à superfície de contacto
l_s	Comprimento do corpo não roscado
r	Raio de curvatura
s	Largura entre superfícies

As porcas são elementos cuja designação é muito similar à dos parafusos. Seguidamente é apresentado um exemplo de designação de uma porca hexagonal:

$$\underbrace{ISO\ 4032}_{(1)} - \underbrace{M\ 12}_{(2)} - \underbrace{8}_{(3)}$$

Tal como no caso dos parafusos, a designação destes elementos encontra-se dividida em três parcelas diferentes. A parcela (1) faz referência à norma seguida pela porca, tratando-se no exemplo apresentado da norma das porcas hexagonais. Na parcela (2) encontra-se o tipo de rosca, tratando-se de uma rosca métrica indicada pela letra M, e o diâmetro nominal. Na parcela (3) é apresentada a classe do material da porca.

Consultando a norma deste componente, é possível encontrar as dimensões apresentadas na Figura 2.

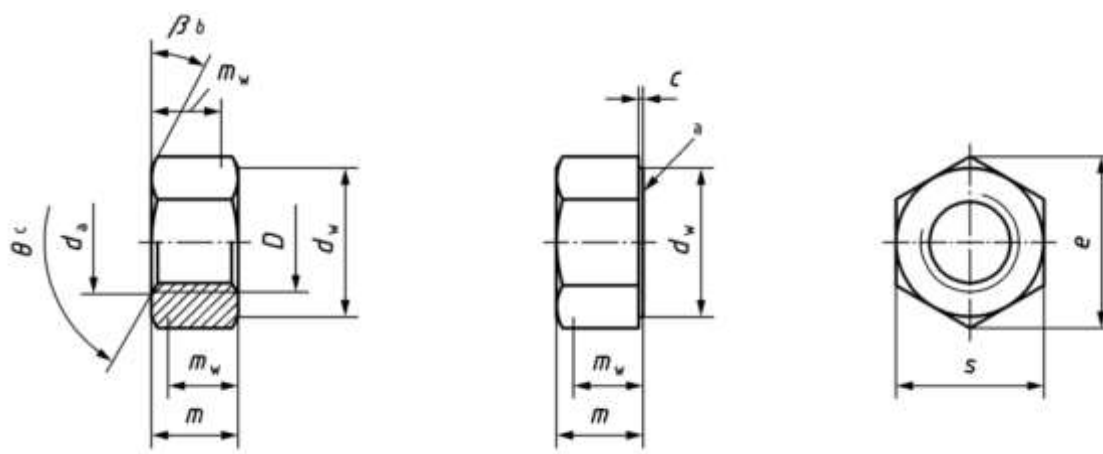


Figura 2 - Dimensões presentes na norma ISO 4032 (ISO 1999).

Tal como no caso dos parafusos, a Figura 2 apresenta um conjunto de letras, sendo tais referentes às seguintes dimensões:

c	Altura da face da anilha
D	Diâmetro nominal da rosca
d _a	Diâmetro de transição
d _w	Diâmetro da superfície de contacto
e	Largura entre cantos
m	Altura da porca
m _w	Altura de torção
r	Raio de curvatura
s	Largura entre superfícies

É ainda de interesse assinalar que, como no caso dos parafusos, a norma apresentada aborda apenas um tipo de porcas, as hexagonais, existindo uma grande variedade destes elementos e, como tal, uma multiplicidade de normas que os descrevem (Simões Morais 2012).

2.1.2 Esforços nas juntas aparafusadas

Existem duas classificações possíveis para as juntas aparafusadas, variando entre si na direção de aplicação do esforço externo. Desta forma, se a direção de ação das forças externas é aproximadamente paralela ao eixo central do parafuso, o parafuso encontra-se esforçado à tensão e a junta designa-se junta tensionada. No caso do esforço aplicado ser aproximadamente perpendicular ao eixo central do parafuso, este último encontra-se esforçado ao corte e a junta é designada de junta ao corte (Bickford 2007). A diferença anteriormente descrita é esquematizada na Figura 3.

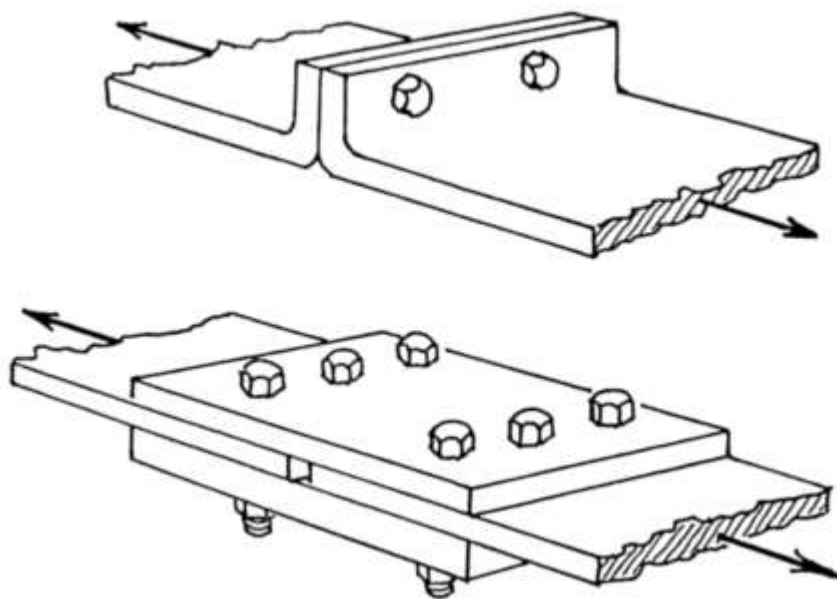


Figura 3 – Esquema de uma junta tensionada (em cima) e junta ao corte (em baixo) (Bickford 2007).

A distinção entre os dois tipos de juntas é particularmente importante uma vez que estas diferem no tipo de resposta aos esforços, na forma como cedem, na forma como são montadas, entre outras. O papel do conjunto parafuso/porca também difere entre os dois tipos de junta. Numa junta tensionada, este conjunto deve exercer uma força que impeça a separação dos elementos a unir enquanto que numa junta ao corte a força exercida deve impedir o escorregamento dos elementos (Bickford 2007).

Em ambos os casos, o conjunto parafuso/porca é responsável pela aplicação de um esforço de compressão na junta. Tal esforço resulta da introdução de energia no sistema, aquando do aperto da junta e acumulada no conjunto parafuso/porca como energia potencial e designa-se por pré-esforço da junta (Bickford 2007). Na Figura 4 é exibido um esquema deste fenómeno.

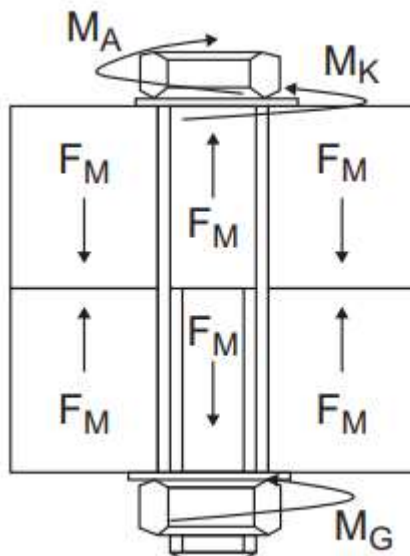


Figura 4 - Esquema do pré-esforço numa junta aparafusada (Lee e Ho 2012).

Na Figura 4 é visível que no momento do aparafusamento da junta, onde é aplicado um momento de aperto no parafuso, representado por M_A , e um momento na porca, designado por M_G , gera-se uma força de pré-esforço (F_M) que desenvolve um comportamento compressivo na junta e tensiona o parafuso. É também apresentado na figura o momento de resistência ao aperto, resultante da fricção da superfície inferior da cabeça do parafuso com as peças a unir, representado por M_K . Tais esforços causam uma compressão dos elementos a unir e uma elongação ao nível do parafuso, podendo estas deformações ser calculadas através das curvas de comportamento dos materiais dos elementos no regime elástico (Bickford 2007).

Na Figura 5 é possível observar o diagrama que dita o comportamento dos elementos a unir, sendo as retas obtidas através do cálculo do módulo de elasticidade de ambos os elementos, encontrando-se representado no pré-esforço da junta (F_p), a compressão dos elementos a unir, medida a partir de O_J (ΔT) e o alongamento do parafuso, medido desde O_B (ΔL).

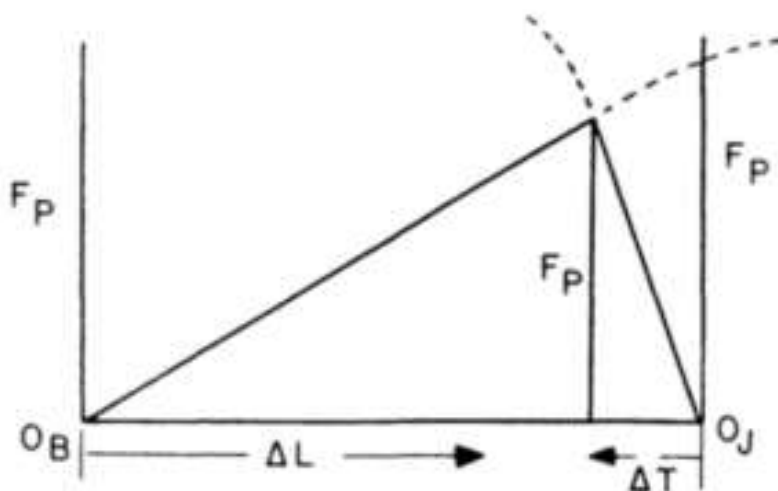


Figura 5 - Diagrama da junta pré-esforçada (Bickford 2007).

A distribuição da tensão no parafuso resultante do aparafusamento da junta não é uniforme, sendo a sua distribuição estudada por Yu e Zhou (2015) e apresentada na Figura 6.

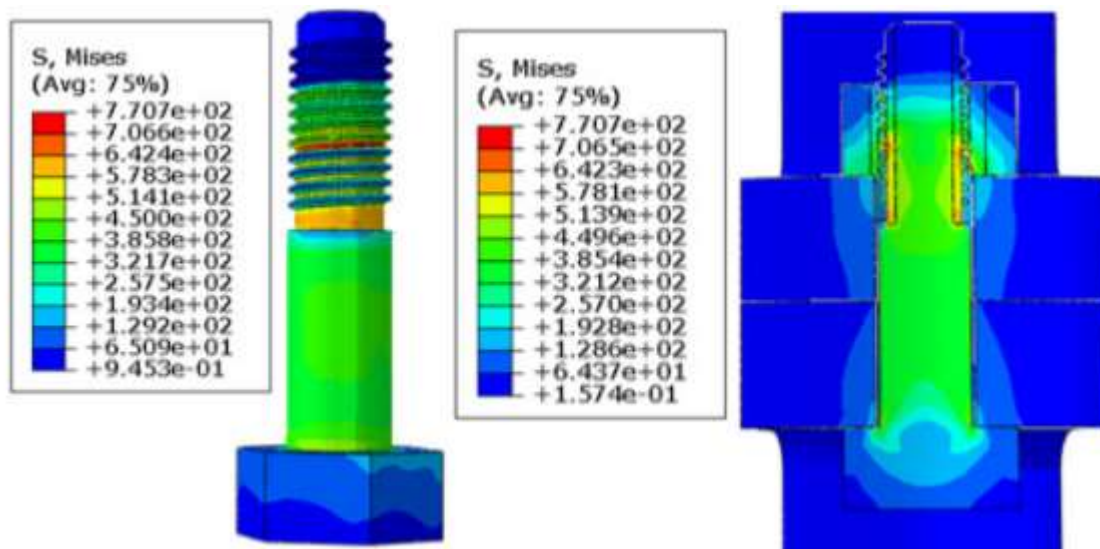


Figura 6 - Distribuição das tensões num parafuso numa junta pré-esforçada (Yu e Zhou (2015)).

Quando é aplicado um carregamento externo, o comportamento da junta depende do tipo de junta em questão. Quando se trata de uma junta tensionada, o esforço externo é dividido pelo parafuso e pelos elementos a unir de forma contrária. Enquanto que no parafuso o esforço externo é adicionado ao esforço derivado do pré-esforço, no caso dos elementos a unir o esforço de compressão é aliviado. Tal comportamento depende do módulo de elasticidade dos materiais de ambos os elementos e pode ser calculado através do diagrama da junta pré-esforçada (Bickford 2007). O efeito do esforço de tração é apresentado na Figura 7

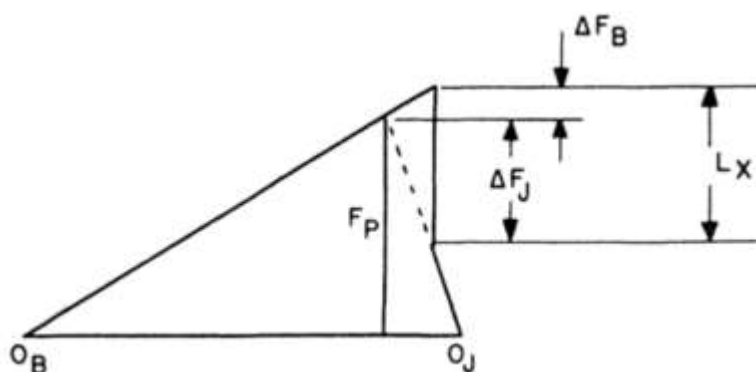


Figura 7 - Diagrama de uma junta pré-esforçada sujeita a um esforço de tração (Bickford 2007).

Por análise da Figura 7 é possível observar que o esforço externo, representado por L_X , causa a variação de esforço ΔF_B no parafuso, o qual amplifica o efeito do pré-esforço F_P , e a variação ΔF_J nos elementos, que é subtraída ao pré-esforço. A deformação do parafuso e dos elementos a unir é calculada através das distâncias do novo ponto máximo a O_B e O_J , respetivamente.

A distribuição dos esforços de tensão e compressão no conjunto parafuso/porca e nos elementos a unir é representada na Figura 8.

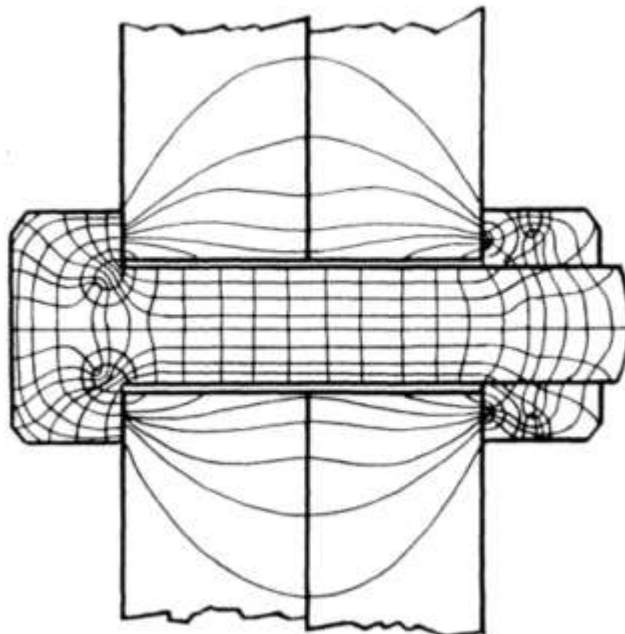


Figura 8 - Linhas de tensão e compressão numa junta aparafusada tensionada (Bickford 2007).

No caso das juntas ao corte, o esforço que a junta admite depende de dois fatores (Bickford 2007):

- (i) A força de fricção existente entre os elementos a unir;
- (ii) A resistência dos parafusos a esforços de corte.

O comportamento das juntas é ditado pela conjugação dos dois fatores anteriormente descritos. No caso do efeito da fricção, este depende do coeficiente de fricção dos elementos a unir e da força de compressão à qual estão sujeitos. Neste efeito não se verifica qualquer alteração no esforço ao qual o parafuso se encontra sujeito, sendo absorvido pelos elementos a unir.

No caso de juntas dependentes da resistência dos parafusos não se verifica alterações nos esforços dos elementos a unir, sendo o esforço totalmente absorvido pelo parafuso, como é exemplificado na Figura 9. De ressaltar que o comportamento geral da junta a este tipo de esforços é uma junção dos dois fatores anteriormente descritos.

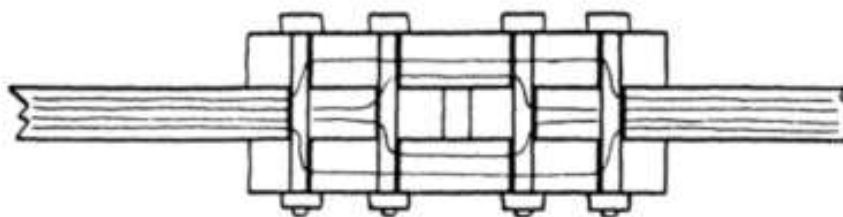


Figura 9 - Distribuição de tensões em juntas dependentes da resistência ao corte dos parafusos (Bickford 2007).

2.1.3 Método de fabrico convencionais

A produção de parafusos e porcas utiliza diversos processos de fabrico, sendo estes métodos abordados seguidamente.

Parafusos

É através de conformação a frio que a maioria dos parafusos são produzidos na atualidade. Neste processo, os elementos são sujeitos a uma deformação plástica à temperatura ambiente (Böllhoff 2007), passando por vários estados de processamento até que é atingida a forma pretendida (Würth 2019). A sequência na produção de parafusos, esquematizada na Figura 10, é abordada de seguida.

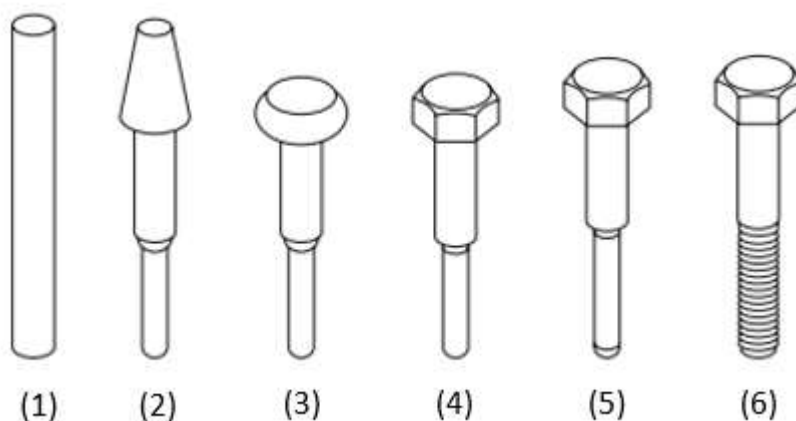


Figura 10 - Diferentes etapas no fabrico de um parafuso (Würth 2019).

O processo de fabrico dos parafusos inicia-se com o material base fornecido sob a forma de varão enrolado numa bobina. Este é sujeito a um tratamento térmico de recozido de amaciamento, seguido por um banho de uma solução aquosa contendo ácido sulfúrico para remover os óxidos. Posteriormente é realizado um revestimento à base de fosfato, de forma a evitar a corrosão, e lubrificado, de modo a facilitar as posteriores operações de moldação.

Ultrapassado o pré-processamento, o varão atravessa um conjunto de roldanas responsáveis por esticar o material. Posteriormente é cortado com um comprimento aproximado ao do parafuso desejado, atingindo o estado 1 da Figura 10.

A cabeça do parafuso é conformada através da passagem sequencial por matrizes. Estas são responsáveis por formar uma pequena coluna, através da deformação na zona onde irá ser produzida a cabeça, adquirindo a forma do estado 2. Seguidamente ocorre um aumento de diâmetro e arredondamento da cabeça, obtendo-se a forma 3. Por fim, numa última etapa de processamento da cabeça, esta é novamente prensada de forma a atingir o estado 4.

Terminado o processamento da cabeça é ainda necessário transformar a extremidade oposta do parafuso. Primeiramente é maquinado o chanfro sendo seguidamente maquinada a rosca. Esta última é obtida através de um processo de laminagem que utiliza duas placas, uma móvel e outra fixa, sendo que na superfície da primeira encontra-se o negativo do perfil a obter,

tal como é esquematizado na Figura 11. A movimentação relativa das placas é responsável pela maquinagem do perfil (Coelho 2014).

Quando este processo é terminado, os parafusos obtidos são alvo de inspeções de modo a garantir que se encontram em concordância com a norma a seguir e que cumprem os critérios de segurança.

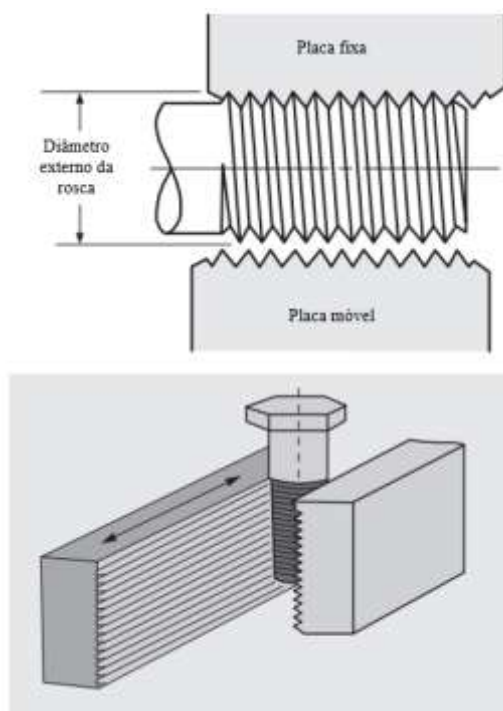


Figura 11 - Obtenção da rosca no corpo do parafuso (Adaptado de Würth (2019)).

Porcas

Relativamente à produção de porcas, estas seguem um procedimento semelhante ao dos parafusos, com diferenças tanto na quantidade de material utilizado como no processo de geração de rosca. Estas sofrem um processo de conformação a frio em tudo similar ao dos parafusos, diferenciando deste na forma das matrizes utilizadas, que conforma a geometria das porcas (Samanta e Dutta 2012).

A maior diferença entre os dois processos encontra-se no processo de obtenção da rosca. No caso das porcas é utilizado um macho para maquinar a rosca interna. Tal processo é esquematizado na Figura 12.

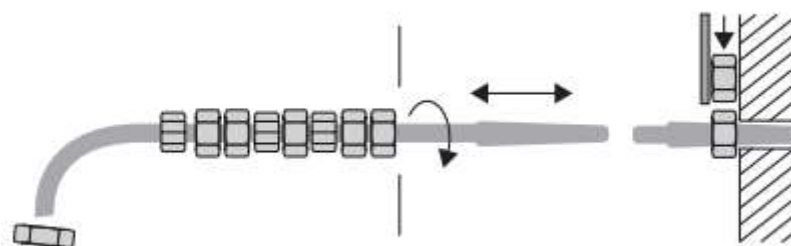


Figura 12 - Obtenção da rosca interna da porca (Würth 2019)

Os processos anteriormente referidos são relativos à produção em massa destes componentes. A obtenção de elementos roscados também pode ser feita através de diversos métodos de maquinagem, como são exemplo a fresagem ou o torneamento (Engineers 2008). Um exemplo de sequência de maquinagem num torno de um parafuso e porca é apresentada na Figura 13.

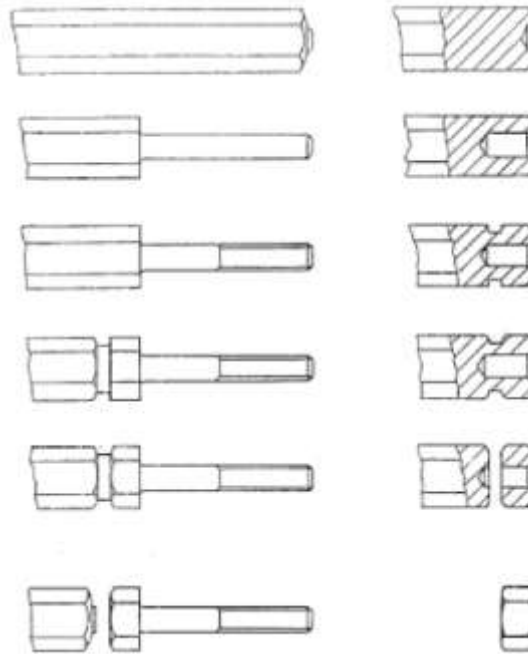


Figura 13 - Sequencia de torneamento de uma porca e parafuso (de cima para baixo)
(Engineers 2008).

2.1.4 Materiais

Os materiais dos parafusos e porcas são normalmente escolhidos com base na sua resistência mecânica, densidade, resistência à corrosão, propriedades magnéticas, tempo de vida e custo. A maioria destes elementos é fabricado em aço, com especificações ditadas pelas normas, e são agrupados em classes (Juvinal 2017).

As classes de materiais são caracterizadas por dois números. O primeiro número é 1/100 da tensão de rutura mínima admitida pela classe, em MPa. O segundo é 1/10 da razão entre a tensão limite elástico mínima e a tensão de rutura mínima, expressa em percentagem. Através desta designação, um material cuja classe seja 5.6 apresenta uma tensão de rutura de, no mínimo, 500 MPa (5×100) e uma tensão limite elástico de 300 MPa ($6 \times 10 = 60\%$, $0,6 \times 500 = 300$ MPa) (Böllhoff 2007).

Na Tabela 1 é possível encontrar algumas propriedades mecânicas associadas às classes de aço.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas das classes de aços utilizados em parafusos e porcas
(Adaptado de ISO 898-1)

Propriedades Mecânicas	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 d≤16mm/d≥16mm	10.9	12.9
Tensão de Rutura Mínima [MPa]	330	400	400	500	500	600	800/830	1000	1200
Dureza Vickers Mínima [HV]	95	120	130	155	160	190	250/255	320	385
Tensão Limite Elástico Mínima [MPa]	180	240	320	300	400	480	-	-	-
Máxima elongação [%]	25	22	-	20	-	-	12/12	9	8

Tal como referido anteriormente, os materiais mais utilizados na produção destes elementos tratam-se de aços, dos quais se destacam os aços AISI 1010, 1018 e 1038, não sendo, no entanto, os únicos utilizados. Além da produção em aço, os parafusos e as porcas também podem ser produzidos em aço inoxidável, latão, alumínio, titânio, entre outros (Speck 2018).

No que toca à produção de parafusos e porcas em polímeros os materiais mais utilizados são o Nylon, PVC, PLA, PEEK, PP, PC, entre outros (Rajesh et al. 2018).

Na Figura 14 é possível encontrar uma comparação da tensão limite elástico e da tensão de rutura dos materiais mais comuns utilizados na produção destes elementos. A azul encontram-se representados os materiais poliméricos, a roxo os materiais não ferrosos e a azul marinho os aços. Na figura também se encontra destacado o PLA, material utilizado neste trabalho.

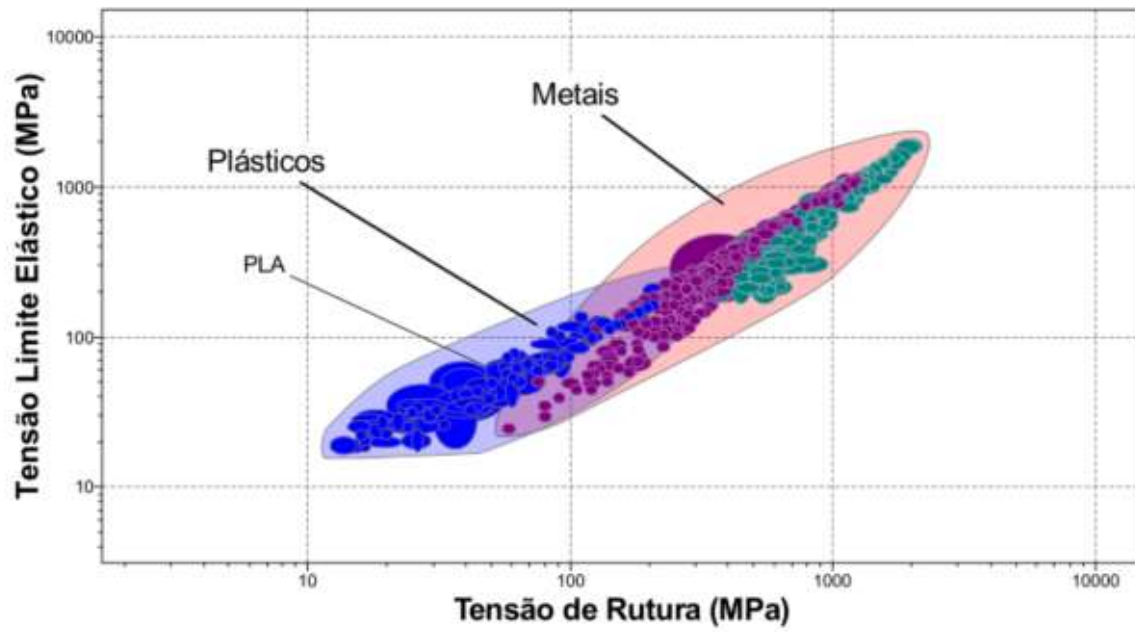


Figura 14 - Comparação dos materiais mais utilizados para a produção de parafusos e porcas (Granta 2018).

2.2 Fabrico Aditivo

Fabrico Aditivo (FA) pode ser definido como um processo de fabrico por meio de adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente, o chamado modelo CAD (*computer-aided design* — Desenho Assistido por Computador). Este método permite a obtenção componentes físicos a partir de vários tipos de materiais, em diferentes formas e a partir de diversos princípios (Volpato *et al.* 2017).

O processo de FA é constituído genericamente por 5 etapas diferentes (Volpato *et al.* 2017):

- (1) A modelação tridimensional da peça a obter, sendo esta geralmente feita através de um modelo CAD;
- (2) A transformação do modelo CAD num formato específico para FA, usualmente representado por uma malha de triângulos, num formato adequado ao processo (por exemplo STL — *Stereolithography*, AMF — *additive manufacturing format*, ou outro);
- (3) O planeamento do processo de fabrico das diferentes camadas (definição das camadas, escolha de estruturas de suporte e estratégias de deposição de material);
- (4) O fabrico da peça no equipamento de FA;
- (5) O pós-processamento da peça obtida, que difere em função da tecnologia utilizada (pode ser necessária uma etapa de limpeza, etapas adicionais de processamento e acabamento com processos de maquinaria convencional).

Na Figura 15 é possível observar a sequência das etapas anteriormente descritas. A sequência apresentada trata-se de uma generalização, existindo certos processos de FA que não necessitam de atravessar todas as etapas descritas.

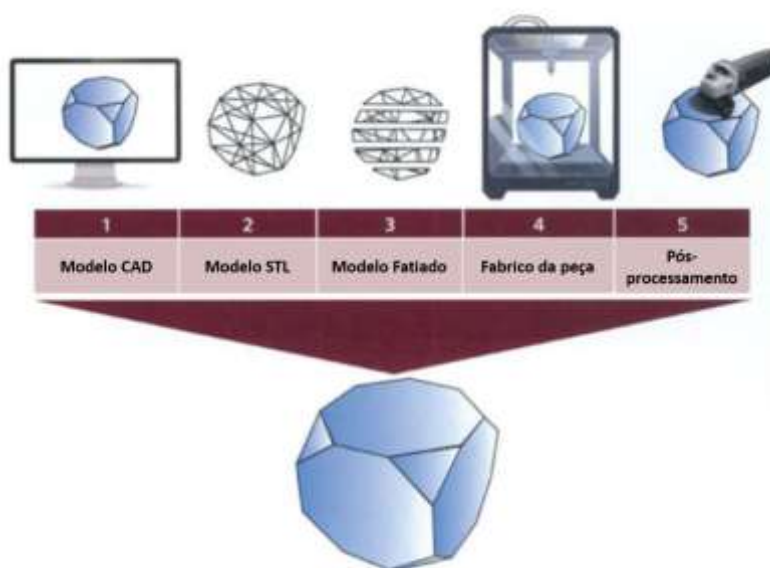


Figura 15 - Etapas do Fabrico Aditivo (Adaptado de Cotteleer, Holdowsky e Matho (2013)).

As diversas tecnologias de FA diferenciam-se entre si tanto na maneira como o material é fornecido como no princípio que aplicam para transformar o material. A norma ISO/ASTM 52900:2015 define a divisão das tecnologias em sete categorias distintas que se encontram descritas na Tabela 2 (Volpato *et al.* 2017).

Tabela 2 - Classificação das tecnologias FA¹ (Adaptado de Volpato *et al.* (2017)).

Classificação das tecnologias FA	Descrição dos Princípios	Algumas tecnologias na categoria
<i>Vat photopolymerization</i>	Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente numa cuba por polimerização ativada por luz	Estereolitografia (<i>Stereolithography – SL</i>), produção contínua com interface líquida (<i>Continuous Liquid Interface Production – CLIP</i>), tecnologia da empresa InvisionTEC, outros
<i>Material extrusion</i>	Material é extrudido através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado	<i>Fused Deposition Modeling – FDM</i> , MakerBot, RepRap, Fab@Home, outros
<i>Material jetting</i>	Material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva	PolyJet, impressão por múltiplos jatos (<i>MultiJet printing – MJP</i>), tecnologia da Solidscape, outros
<i>Binder jetting</i>	Um agente líquido aglutinante é seletivamente depositado para unir materiais em pó	Impressão colorida por jato (<i>ColorJet Printing – CJP</i>), tecnologia da VoxelJet, tecnologia da ExOne, outros
<i>Powder bed fusion</i>	Energia térmica seletivamente funde regiões de uma base de pó	Sinterização seletiva a laser (<i>Selective laser sintering – SLS</i>), sinterização direta de metal a laser (<i>Direct Metal Laser Sintering – DMLS</i>), fusão seletiva a laser (<i>Selective laser melting – SLM</i>) LaserCUSING, fusão por feixe de eletrões (<i>Electron beam melting – EBM</i>), outros
<i>Sheet lamination</i>	Camadas de material são unidas para formarem um objeto	Fabrico laminar de objetos (<i>Laminated Object Manufacturing – LOM</i>), tecnologia da Solido, deposição seletiva de laminados (<i>Selective Deposition Lamination – SDL</i>), outros

Continua

¹ A terminologia inglesa é utilizada em diversas questões relacionadas com o Fabrico Aditivo devido à falta de terminologia específica estabelecida na língua portuguesa.

Tabela 2 - Classificação das tecnologias FA¹ (adaptado de Volpato *et al.* (2017))
(continuação).

<i>Directed energy deposition</i>	Energia térmica é usada para fundir materiais à medida que estes são depositados	Forma final obtida com laser (<i>Laser Engineered Net Shaping – LENS</i>), deposição direta de metal (<i>Direct Metal Deposition – DMD</i>), revestimento a laser tridimensional (<i>3D laser cladding</i>), outros
--	--	---

A indústria de FA tem vindo a crescer nos últimos nove anos, após um declínio em 2009. Entre 2015 e 2018 as receitas cresceram uma média de 24,4% ao ano. No entanto, nem todas as tecnologias se conseguiram afirmar, sendo apresentada na Figura 16 as diferentes quotas de mercado, referentes ao ano de 2018 (Wohlers 2019).

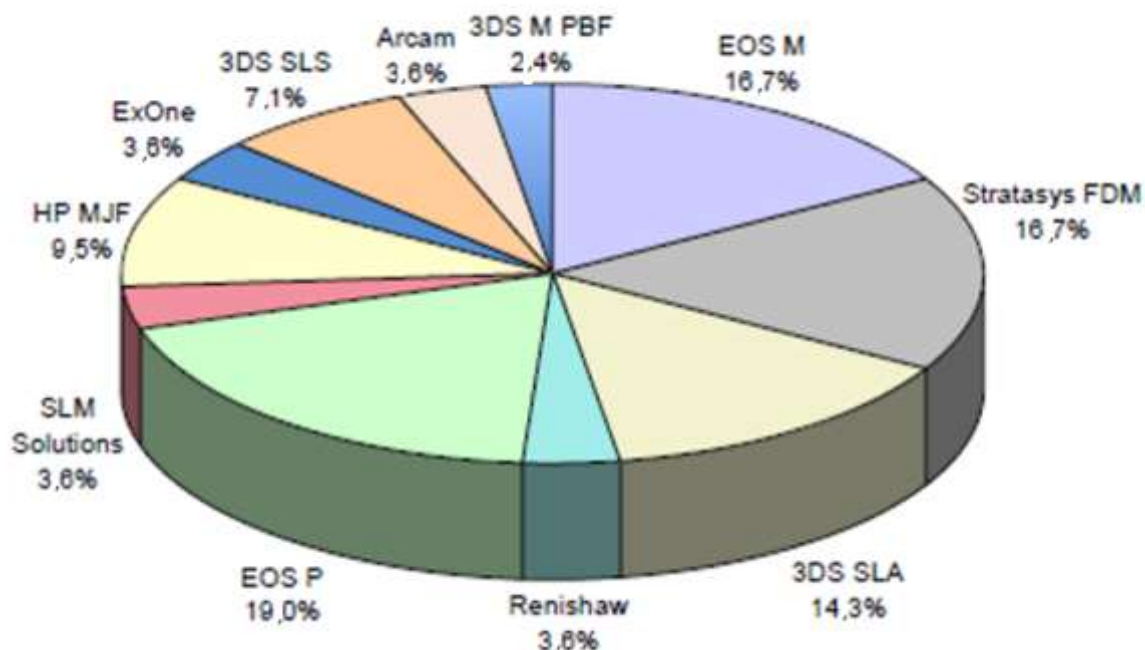


Figura 16 - Quota de mercado de FA por tecnologia (Wohlers 2019).

Incluída nas tecnologias com maior quota de mercado encontra-se a *Fused Deposition Modelling* (FDM) desenvolvida pela *Stratasys Ltd.*, tendo esta por base o processo de extrusão de material, sobre o qual se dedica a seguinte secção.

2.3 Fabrico Aditivo por Extrusão

Os processos enquadrados neste grupo de FA depositam material na forma de filamento de diâmetro reduzido, sendo este obtido pelo princípio de extrusão de material através de um bico calibrado. De forma a obter-se a geometria de cada camada, o sistema de extrusão é normalmente montado sobre um sistema com movimentos controlados no plano X-Y. Usualmente, este sistema opera sobre uma plataforma de construção que inclui um sistema de elevação, que a desloca para baixo na direção do eixo Z quando cada camada é terminada, numa distância equivalente à espessura de camada. Existe também a possibilidade de ser o sistema extrusor responsável pela movimentação em Z. O processo é repetido a cada camada de material depositado, até que a peça seja terminada (Volpato et al. 2017).

Dentro dos diversos tipos de tecnologias de FA por extrusão encontra-se a comercialmente designada por *Fused Deposition Modelling*² (FDM), desenvolvida pela *Stratasys Ltd*. No caso do FDM, o material é fornecido sob a forma de filamento continuo e o sistema de alimentação baseia-se num sistema de roldanas. A simplicidade deste sistema é o fator diferenciador do mesmo em relação a outros sistemas de fabrico aditivo por extrusão, sendo um fator também ele diferenciador em relação aos restantes métodos de fabrico aditivo (Volpato et al. 2017). Um esquema típico de um equipamento de FDM é apresentado na Figura 17.

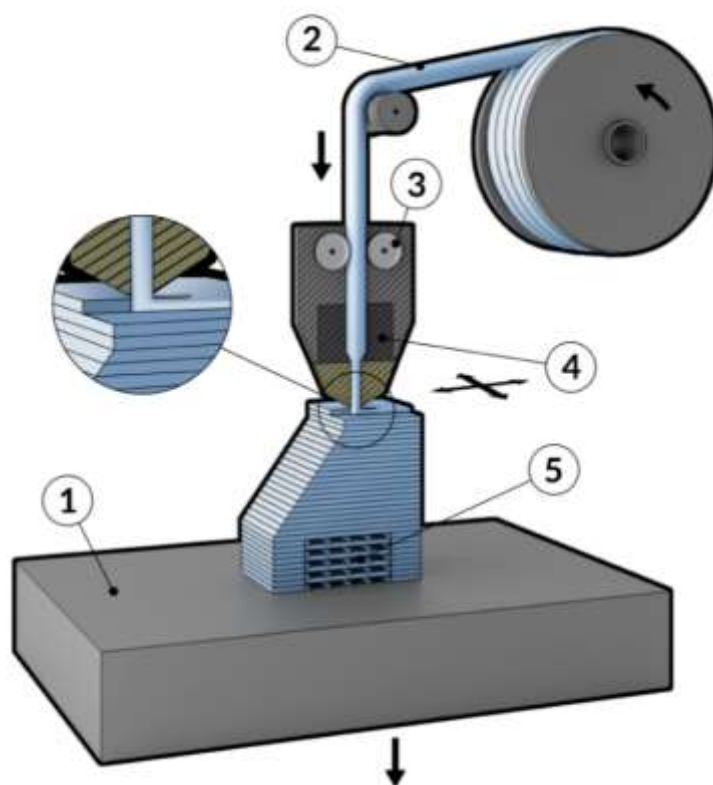


Figura 17 - Processo de FDM (ManufacturingGuide 2016).

² O processo de FDM também pode ser designado como *Fused Filament Fabrication* (FFF) uma vez que o termo FDM é uma marca registada pela *Stratasys Ltd*.

Na Figura 17 é possível encontrar um esquema onde o material (2), fornecido na forma de filamento, atravessa o sistema alimentação (3), constituído por um conjunto de roldanas, em direção ao sistema de extrusão (4). Este último encontra-se acoplado a eixos que o movimentam ao longo do plano XY. No final de cada camada construída, a plataforma de construção (1) movimenta-se ao longo do eixo Z uma distância, tal como descrito anteriormente, igual à espessura de camada.

É ainda visível na Figura 17 um material de suporte (5), sendo necessária a sua adição quando o ângulo de construção, ϕ , medido entre a projeção de camadas de construção consecutivas e a plataforma de construção, tende para um valor mais agudo. Neste caso, o material perde a capacidade de autossustentação e passa a necessitar de uma estrutura que garanta que este solidifique na posição pretendida (Leary *et al.* 2013). Os ângulos de construção encontram-se representados esquematicamente na Figura 18, encontrando-se nela a representação de uma sequência de camadas.

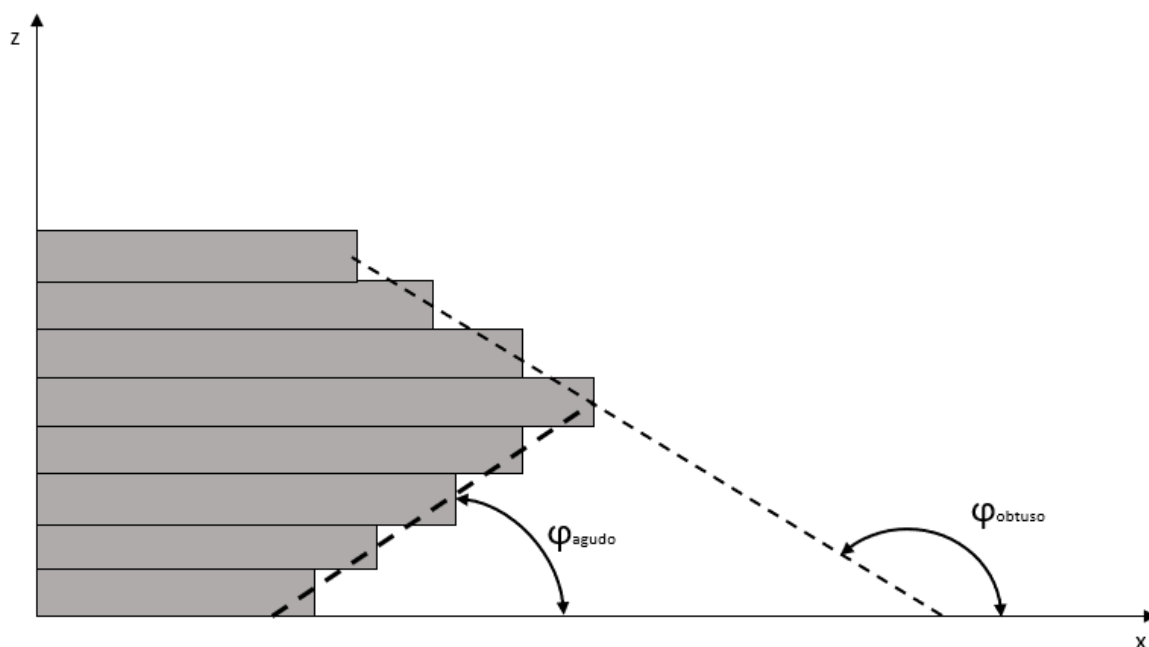


Figura 18 - Ângulos de construção entre camadas.

No caso do FDM, a literatura recomenda que uma peça com um ângulo de construção inferior a 45° deva ser impressa com estrutura de suporte, visto que existe uma deterioração da qualidade superficial se tal estrutura não for adicionada. Quando o ângulo de inclinação é superior a 45° , a nova camada é apoiada em 50% pela camada anteriormente depositada, sendo este valor suficiente para garantir o suporte e adesão entre camadas (Redwood, Schffer e Garret 2017).

As estruturas de suporte podem ser geradas com o mesmo material com que é fabricado a peça ou com um segundo material. A escolha do material que constitui o suporte encontra-se muitas vezes relacionada com o *hardware* da máquina utilizada, visto que nem todos os equipamentos estão habilitados para imprimir vários materiais (Gibson, Rosen e Stucker 2015).

Na Figura 19 é possível encontrar um exemplo de uma peça que, devido à sua geometria, necessitou de estrutura de suporte para ser obtida. Neste exemplo, a estrutura de suporte foi gerada com o mesmo material que a peça, sendo esta posteriormente removidos à mão ou com o auxílio de ferramentas. Neste tipo de solução a remoção das estruturas de suporte deve ser

feita de forma cuidadosa visto que este processo pode danificar a superfície da peça final (Kumar, Kannan e Sankaranarayanan 2014).



Figura 19 - Exemplo de peça com estrutura de suporte (à esquerda) e peça com a estrutura de suporte removida (à direita) (Vanek, Galicia e Benes 2014).

Relativamente ao processo de FDM, este apresenta diversas vantagens comparativamente às restantes tecnologias de FA, sendo exemplo (Volpato *et al.* 2017):

- (1) A simplicidade do princípio de deposição de material;
- (2) Permitir a utilização de vários termoplásticos, inclusive os polímeros classificados como de engenharia;
- (3) Os materiais utilizados serem estáveis quer mecanicamente como quimicamente;
- (4) Não requerem pós-cura dos materiais;
- (5) As peças produzidas terem propriedades mecânicas que, em certos casos, possibilitam a sua utilização em testes funcionais ou em componentes finais;
- (6) Poder ser utilizado em ambiente de escritório com certos materiais visto que não necessitam de exaustão. No entanto, certos plásticos de engenharia podem libertar odores tóxicos.

No que toca às principais limitações desta tecnologia, são de destacar (Volpato *et al.* 2017):

- (1) A precisão dimensional e resolução dos detalhes são fatores limitadores visto que se encontram relacionados com o diâmetro do filamento depositado bem como a espessura de camada;
- (2) A necessidade de estruturas de suporte em certas regiões que pode acrescer ao custo da peça;
- (3) A necessidade de pós-processamento para remoção das estruturas de suporte que, dependendo do material utilizado, pode ser mais simples ou mais demorada;
- (4) Tratar-se de um processo relativamente lento, limitado quer pelo sistema de movimentação quer pela capacidade de extrusão do bico extrusor.

Devido à expiração das principais patentes deste processo, o mercado do FDM encontra-se em pleno crescimento (Roberson, Espalín e Wicker 2013), impulsionado também pelo aparecimento de projetos *open source*, dentre os quais se destacam o *RepRap* e o *Fab@Home* (Volpato *et al.* 2017). Derivado destes projetos, surgiram diversas empresas que inicializaram

o processo de comercialização deste tipo de equipamentos. Entre essas empresas são exemplos a *Bits from Bytes*, fundada em Clevedon, Reino Unido e a *Ultimaker*, da Holanda, tendo sido ambas formadas por elementos integrantes da comunidade *RepRap*. Estas, por volta de 2012, iniciaram a comercialização de equipamentos com um custo de cerca de 2200€, valor significativamente reduzido quando comparado com os 350 000€ de custo do equipamento da *Stratasys Ltd* (Gibson, Rosen e Stucker 2015; Santana 2015). Na Figura 20 encontram-se exemplos de um equipamento da *Stratasys Ltd*, sendo apresentado o modelo *Fortus 360mc*, e outro resultante do projeto *RepRap*.

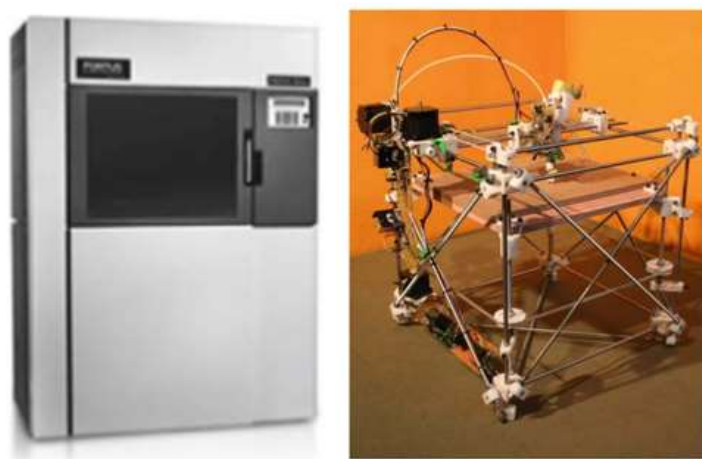


Figura 20 – Equipamento FDM típico da *Stratasys Ltd*. (à esquerda) e exemplo de equipamento *RepRap* (à direita) (Gibson, Rosen e Stucker 2015).

No que toca aos materiais base utilizados pela tecnologia FDM, esta utiliza maioritariamente materiais termoplásticos. Tal como descrito anteriormente, o material é fornecido na forma de filamento, usualmente enrolado numa bobine. O diâmetro do mesmo pode variar entre 1,75mm ou 3mm (González 2016). Entre os termoplásticos mais comuns utilizados no processo FDM encontram-se (Fischer 2018):

- (1) **ABS** — Acrilonitrilo butadieno estireno
- (2) **ASA** — Acrilonitrilo Estireno Acrilato
- (3) **PC** — Policarbonato
- (4) **PLA** — Acido Poliláctico
- (5) **ULTEM** — Polieterimida
- (6) **PPSF/PPSU** — Polissulfona
- (7) **Nylon** — Poliamida
- (8) **TPU** — Poliuretano Termoplástico
- (9) **PEEK** — Poli(éter-éter-cetona)

Por se tratar de um processo com um número elevado de variáveis, existe uma quantidade significativa de parâmetros reguláveis pelo utilizador. Estes encontram-se descritos na secção seguinte.

2.3.1 Parâmetros do Processo

Os produtos finais obtidos por fabrico aditivo por extrusão, podem ser avaliados por dois índices diferentes. Estes podem ser índices técnicos, como a resistência à tração, flexão ou impacto, ou económicos, como o tempo de processamento, quantidade de material utilizado e suportes utilizados. Tais encontram-se diretamente relacionados com os parâmetros do processo, os quais são determinados e controlados pelo utilizador (Santana *et al.* 2015; Górski, Kuczko e Wichniarek 2013).

Existem diversos parâmetros associados ao processo de FDM, sendo estes fatores decisivos em certas características das peças finais. Dento da multiplicidade de parâmetros existentes, é de interesse para o presente trabalho destacar os seguintes:

Orientação de Construção

Refere-se à orientação da peça, na plataforma de construção, em relação aos eixos X, Y e Z (Kohad e Dalu 2017). Na Figura 21 é possível observar as diferentes orientações que a peça pode ter na plataforma de construção. As orientações apresentadas não são as únicas em que a peça pode ser construída, podendo apresentar qualquer tipo de rotação ou inclinação relativamente às posições apresentadas.

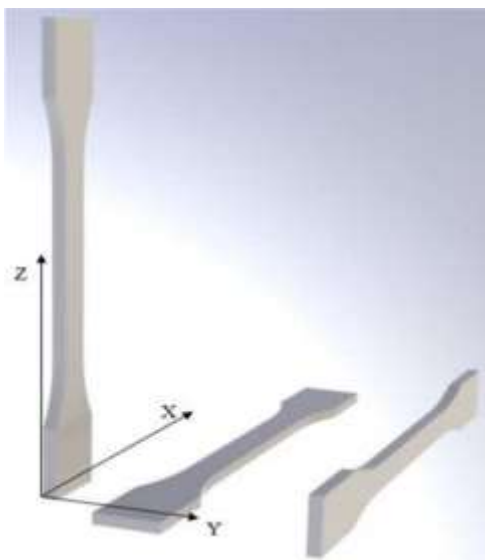


Figura 21 - Orientação de construção vertical, paralela e horizontal (da esquerda para a direita) (Spišák, Gajdoš e Slota 2014).

Espessura de Camada (altura de camada)

É a espessura de uma camada depositada pelo bico extrusor. Este valor é função do material a imprimir e do diâmetro do bico extrusor (Kohad e Dalu 2017). Uma representação esquemática da variação deste parâmetro é observável na Figura 22.

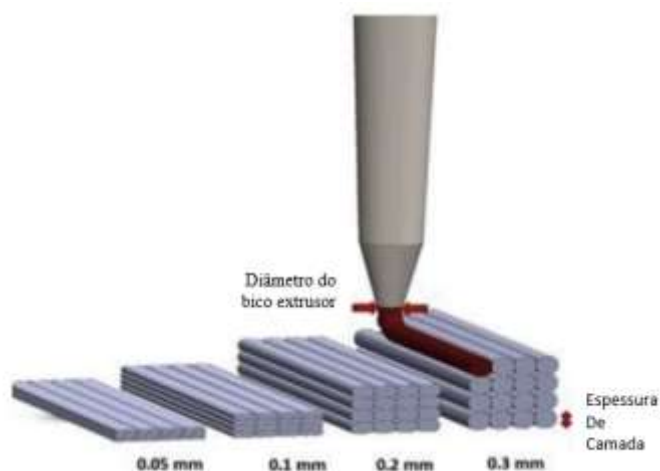


Figura 22 - Variação da espessura de camada (Adaptado de Ayrlmis (2018)).

Espaçamento entre filamentos de preenchimento (*air gap*)

Refere-se à distância entre filamentos depositados adjacientemente na zona de preenchimento, medida no plano XY (Kohad e Dalu 2017). Na Figura 23 é possível observar o efeito da alteração deste parâmetro numa camada depositada.



Figura 23 - Espaçamento entre filamentos de preenchimento de 0,127mm, 0,254mm e 0,381mm (da esquerda para a direita) (Adaptado de Spišák, Gajdoš e Slota (2014)).

Este mesmo parâmetro pode ser configurado entre filamentos de contorno depositados ou entre o filamento de contorno e de preenchimento mais próximo do contorno (Kohad e Dalu 2017).

Ângulo de preenchimento (ângulo de varrimento)

Corresponde ao ângulo formado entre o filamento de preenchimento depositado e o eixo X (Kohad e Dalu 2017). Na Figura 24 este ângulo encontra-se representado através da letra θ .

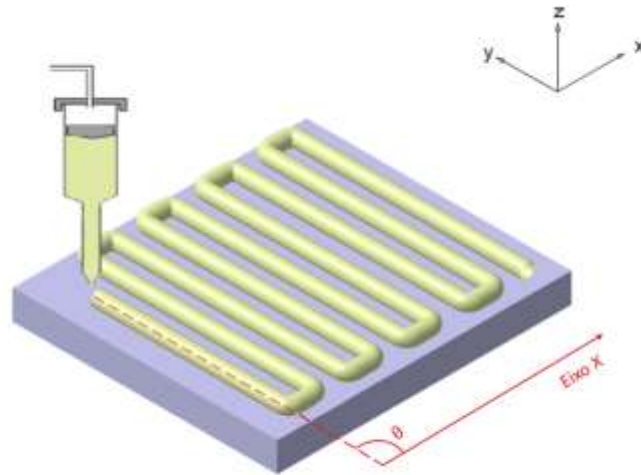


Figura 24 - Representação do ângulo de preenchimento (Adaptado de Wu *et al.* (2015)).

Largura do filamento depositado

Corresponde à largura, medida paralelamente ao plano de construção, do filamento depositado. Este parâmetro pode ser configurado tanto no filamento de contorno como no filamento de preenchimento (Kohad e Dalu 2017). O efeito deste parâmetro é observável na Figura 25.

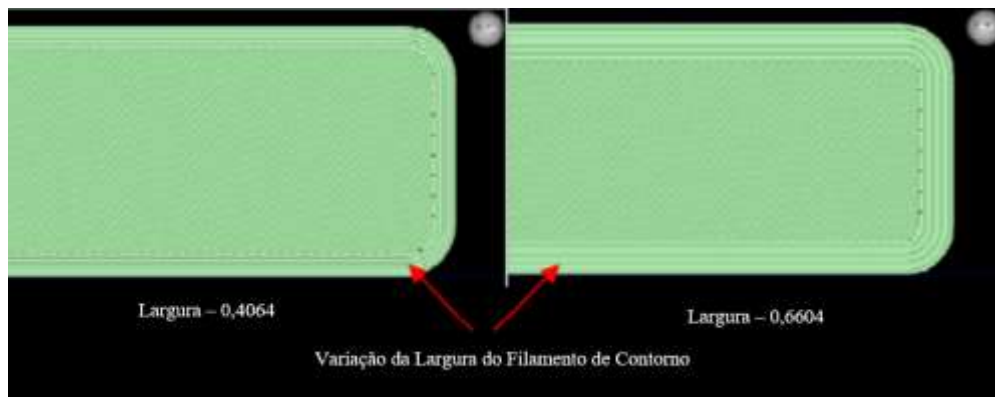


Figura 25 - Variação da largura do filamento de contorno depositado (Adaptado de Ali, Chowdary e Maharaj (2014)).

Número de Perímetros (número de perímetros)

Corresponde ao número de perímetros utilizados para definir as paredes exteriores e interiores da peça. A Figura 26 ilustra a influência deste parâmetro numa camada impressa.



Figura 26 - Variação do número de perímetros entre 1, 2 e 3 (da esquerda para a direita) (Spišák, Gajdoš e Slota 2014).

Diâmetro do bico extrusor

Refere-se ao diâmetro interior do extrusor instalado no sistema de alimentação (Yang *et al.* 2019), encontrando-se o mesmo representado na Figura 22 . Este parâmetro é de particular importância visto que afeta as dimensões do material depositado bem como a quantidade de material depositado (Agarwala *et al.* 1996).

Temperatura de extrusão

É a temperatura responsável pela transformação do material extrudido. Este parâmetro influencia a fluidez do material utilizado na impressão, a capacidade do mesmo material se interligar com o previamente depositado e a estabilidade de forma do material após a deposição (Tian *et al.* 2016).

Velocidade de preenchimento

É a velocidade linear de movimentação do sistema de extrusão quando se encontra no processo impressão (Yang *et al.* 2019).

Multiplicador de Extrusão

Parâmetro que controla a quantidade de material extrudido por cada movimentação do sistema de alimentação, sendo responsável por pequenos ajustes do último (Lanaro *et al.* 2017; Santana, Lino Alves e da Costa Sabino Netto 2017).

Percentagem de preenchimento

É a quantidade de material que se encontra no interior da peça, usualmente apresentado sob a forma de percentagem. Influencia as propriedades mecânicas das peças impressas e também o tempo de impressão das mesmas (Grasso *et al.* 2015) e é função de variação de certos parâmetros anteriormente explicados. Na Figura 27 são apresentados exemplos de peças impressas com diferentes percentagens de preenchimento.

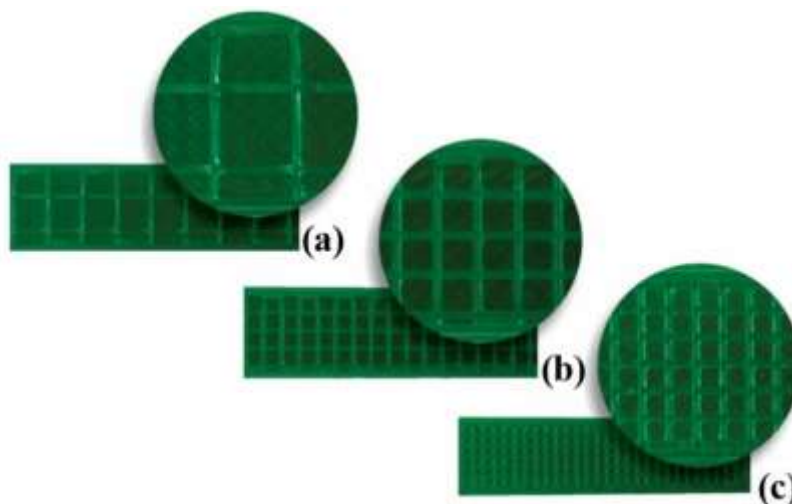


Figura 27 - Variação da densidade de preenchimento entre 10% (a), 20% (b) e 30% (c) (Luzanin *et al.* 2017).

Temperatura da plataforma de construção

É a temperatura à qual a plataforma de construção é mantida durante o processo de impressão. Este parâmetro depende do material a ser impresso e encontra-se relacionado com a adesão do material à plataforma bem como prevenção de fenómenos de contração térmica (Grasso *et al.* 2015).

Estratégia de deposição

Refere-se ao padrão seguido aquando da deposição do preenchimento, existindo diversos modelos incorporados por predefinição no *software* de fatiamento. Dos padrões mais utilizados são exemplos o linear, retilíneo, grelha, triangular, estrela, cubico, concêntrico, *honeycomb*, entre outros (Akhoundi e Behravesch 2019). Alguns destes padrões encontram-se esquematizados na Figura 28.

Fill Pattern	first mode	second mode	third mode	Fill Pattern	first mode	second mode	third mode
Line				Concentric			
Rectilinear				Honeycomb			
Grid				3D Honeycomb			
Triangle				Hilbert curve			
Star				Archimedean Chords			
Cubic				Octagram spiral			

Figura 28 - Padrões de preenchimento (Akhoundi e Behravesht 2019)

Os parâmetros do processo FDM desempenham um papel primordial relativamente à rugosidade, precisão dimensional, propriedades mecânicas e tempo de construção. Estes tópicos tem sido alvo de intensa pesquisa académica direcionada para a obtenção de resultados e otimização dos parâmetros (Kohad e Dalu 2017).

Nos subtópicos seguintes serão aprofundadas as questões das características, mecânicas e dimensionais, das peças obtidas por FDM, bem como os parâmetros que influenciam estas condições.

2.3.2 Características Dimensionais

A precisão dimensional e resolução de peças obtidas por fabrico aditivo por extrusão está diretamente relacionada com os parâmetros do processo selecionados, o design do produto e com as características do material a utilizar. Dependendo da finalidade para a qual a peça é produzida, as características dimensionais das peças podem ser fatores decisivos no diz respeito à funcionalidade da mesma (Gold e Turner 2015).

Dada a importância dos parâmetros do processo neste tipo de características, diversos estudos abordam esta temática, visando o aumento da qualidade das superfícies e o aperfeiçoamento da precisão dimensional (Mohamed, Masood e Bhowmik 2015).

Na Tabela 3 são listados alguns estudos realizados sobre a influência dos parâmetros do processo nas características dimensionais anteriormente descritas. Nesta tabela são também indicados os parâmetros analisados bem como os considerados influentes para a característica estudada.

Tabela 3 - Artigos que analisam características dimensionais.

Referência	Característica Estudada	Parâmetros Estudados	Parâmetros Significantes
Papazetis e Vosniakos (2019)	Precisão dimensional	Espessura de camada, multiplicador de extrusão, velocidade de preenchimento	Todos os estudados
Beniak <i>et al.</i> (2019)	Precisão dimensional	Espessura de camada, temperatura de extrusão	Temperatura de extrusão
Durão <i>et al.</i> (2019)	Precisão dimensional	Largura do filamento depositado, temperatura de extrusão, espessura de camada, velocidade de preenchimento, percentagem de preenchimento, número de perímetros	Velocidade de preenchimento, número de perímetros
Wang <i>et al.</i> (2019)	Rugosidade da superfície e propriedades mecânicas	Diâmetro do extrusor, temperatura de extrusão, velocidade de preenchimento, espessura de camada	Todos os estudados
Continua			

Tabela 3 - Artigos que analisam características dimensionais (continuação)

Pérez <i>et al.</i> (2018)	Rugosidade da superfície	Espessura de camada, velocidade de preenchimento, temperatura de extrusão, largura do filamento depositado no contorno	Espessura de camada, largura do filamento depositado no contorno
Alafaghani <i>et al.</i> (2017)	Precisão dimensional	Orientação de construção, percentagem de preenchimento, velocidade de preenchimento, temperatura de extrusão, espessura de camada, estratégia de deposição	Orientação de construção, temperatura de extrusão, espessura de camada
Kumar, Kannan e Sankaranarayanan (2014)	Rugosidade da superfície	Espessura de camada, espaçamento entre filamentos, largura do filamento depositado, orientação de construção	Espaçamento entre filamentos, espessura de camada, orientação de construção
Santana, Lino Alves e da Costa Sabino Netto (2017)	Precisão dimensional	Espessura de camada, percentagem de preenchimento, velocidade de preenchimento, temperatura de extrusão, multiplicador de extrusão	Percentagem de preenchimento, multiplicador de extrusão
Vijay, Danaiah e Rajesh (2011)	Rugosidade da superfície	Orientação de construção, espessura de camada	Todos em estudo

Por análise dos artigos anteriormente listados, foi possível retirar conclusões relativamente aos parâmetros de processo que mais afetam este tipo de características. Estas conclusões encontram-se seguidamente exibidas, estando agrupadas pela característica dimensional abordada.

(i) Rugosidade da Superfície

A rugosidade da superfície das peças obtidas por FDM foi analisada por Pérez *et al.* (2018) que estudou a influência dos parâmetros espessura de camada, velocidade de preenchimento, temperatura de extrusão e largura do filamento depositado nos perímetros. Com as diferentes medições realizadas das peças cujo fabrico utilizou diferentes combinações de parâmetros, e através de análises de variância dos valores obtidos foi possível determinar os parâmetros que são considerados significantes para esta característica.

As conclusões deste trabalho revelam que os parâmetros influentes foram a espessura de camada e a largura do filamento depositado no contorno. Foi ainda identificado um aumento da rugosidade da superfície que se encontrava associado a um aumento da espessura de camada utilizada. A largura do filamento depositado no contorno desenvolveu efeitos similares a nível da rugosidade da superfície, desenvolvendo uma relação proporcional com este parâmetro.

No estudo desenvolvido por Wang *et al.* (2019) o material em estudo não é PLA, como no trabalho anteriormente descrito, mas sim o PEEK. Este estudo analisa as superfícies das peças impressas num microscópio eletrónico de forma a medir a sua rugosidade superficial. Foi concluído que os parâmetros diâmetro do extrusor, temperatura de extrusão, velocidade de preenchimento e espessura de camada teriam influência ao nível da rugosidade superficial da peça obtida.

Na Figura 29 e Figura 30 são observáveis os resultados das análises à morfologia das superfícies estudadas. Nestas imagens são demonstrados os efeitos da espessura de camada e da velocidade de preenchimento selecionada, verificando-se um aumento da rugosidade com o incremento de ambos os parâmetros.

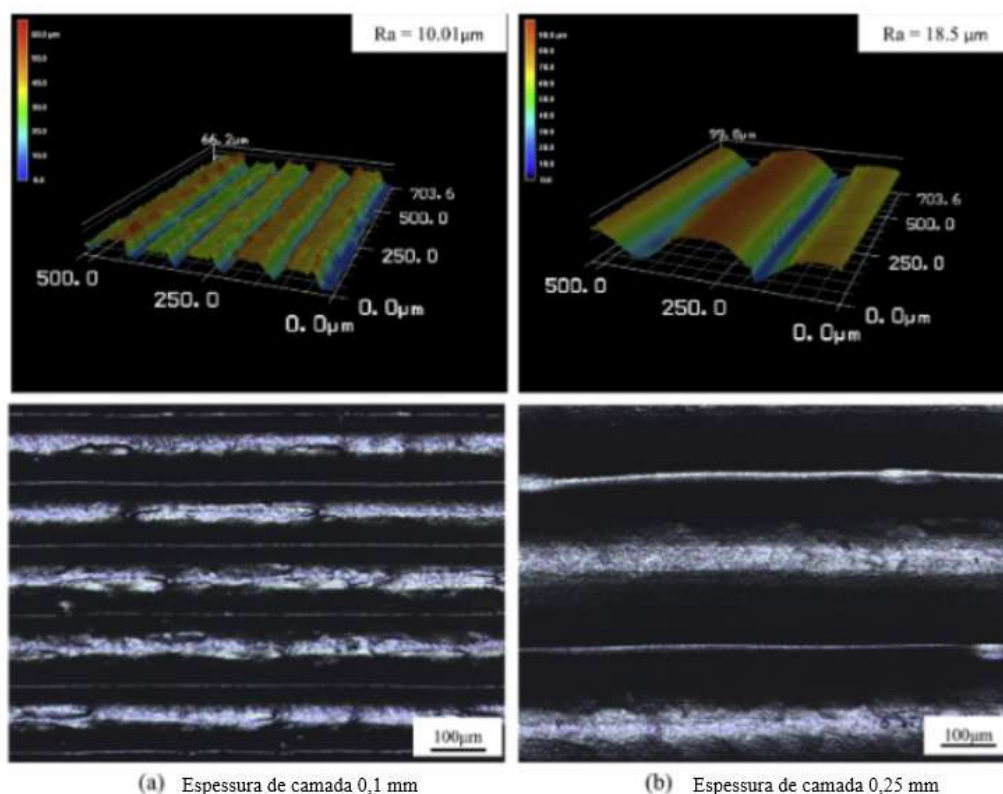


Figura 29 - Análise da rugosidade, utilizando um diâmetro do bico extrusor de 0,4mm, temperatura de extrusão de 400°C, velocidade de preenchimento de 20mm/s e espessura de camada de 0,1 mm (a) e 0,25 mm (b) (Adaptado de Wang et al. (2019)).

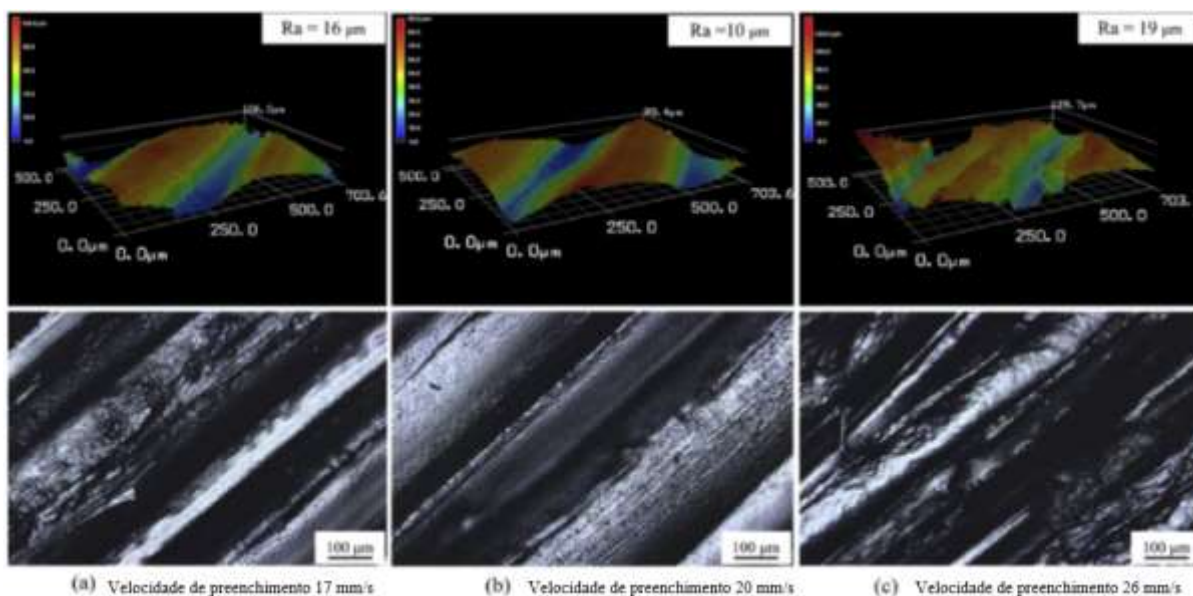


Figura 30 - Análise da rugosidade da superfície na direção vertical, utilizando um diâmetro do bico extrusor de 0,4mm com uma velocidade de preenchimento de 17mm/s (a), 20mm/s (b) e 26 mm/s (c) (Adaptado de Wang *et al.* (2019)).

Os autores concluem que, nos casos apresentados, o espaçamento existente entre diferentes camadas é a principal razão do aumento da rugosidade. O aumento da espessura de camada e as variações na quantidade de material extrudido são a principal causa da variação

deste parâmetro. A variação da velocidade de preenchimento também apresenta uma influência significativa para este efeito.

No seu estudo, Kumar, Kannan e Sankaranarayanan (2014) analisaram a influência da espessura de camada, espaçamento entre filamentos, largura do filamento depositado e orientação de construção na rugosidade superficial. Foi impresso um paralelepípedo em ABS sendo, posteriormente, feita a medição da rugosidade das suas faces. Após estudos estatísticos concluiu-se que os parâmetros que teriam maior influência seriam o espaçamento entre filamentos, a espessura da camada e orientação de construção. É ainda acrescentado que o valor do espaçamento entre filamentos deveria adotar um valor negativo, de forma a evitar o aparecimento de vazios ao nível da camada. Refere-se ainda que o uso de espessuras de camada mais reduzidas permite um aumento na qualidade superficial e que a orientação de construção é vital para a redução do material de suporte necessário. Um aspeto a ter em consideração visto que a remoção do material de suporte pode danificar a superfície da peça a imprimir.

Por fim, Vijay, Danaiah e Rajesh (2011) estudaram a variação da rugosidade superficial em função da orientação de construção e espessura de camada. As medições de rugosidade basearam-se num sensor ótico. Foi feita uma variação na orientação de construção com uma rotação em torno do eixo Z, perfazendo os valores de 20°, 45° e 75°. Após análise dos resultados, concluiu-se que existia uma variação da qualidade superficial com todos os parâmetros em estudo, o que valida as conclusões dos artigos anteriores.

(ii) Precisão Dimensional

Ao nível da precisão dimensional, Papazetis e Vosniakos (2019) desenvolveram um estudo que analisava a precisão dimensional de um modelo CAD desenvolvido pelos próprios. Este modelo continha certas características, como dois furos de 10mm e 5mm de diâmetro e paredes de espessura de 1mm, que visavam a otimização da precisão dimensional do processo com a variação dos parâmetros em estudo. Concluíram que cada característica do processo teria valores ótimos dos parâmetros específicos. Como tal, a melhor estratégia para obter a máxima precisão dimensional seria o desenvolvimento de um *G-Code* que se adaptava a cada característica da peça.

Beniak *et al.* (2019) avaliaram a influência dos parâmetros espessura de camada e temperatura de extrusão em dois modelos diferentes, destinados a medir a precisão dimensional em formas angulares e cilíndricas. Ambos os modelos foram impressos em PLA havendo variação de parâmetros em dois níveis diferentes: espessura de camada de 0,1mm e de 0,2 e temperatura de extrusão de 180°C e de 220°C.

Da análise, concluiu-se que o parâmetro mais influente seria a temperatura de extrusão. Tal justifica-se com as variações na fluidez do material, uma vez que quando este é submetido a uma temperatura superior se torna mais fluido. Tal fluidez provoca um excesso de material depositado que, por ação da gravidade, pode levar à deposição do mesmo em camadas inferiores, levando a uma diminuição na precisão dimensional visto que o material deposita em camadas já finalizadas.

Durão *et al.* (2019) focam o seu estudo em dois aspetos da precisão dimensional: a variação linear da dimensão e a planeza das superfícies. Neste estudo foram abordados os seguintes parâmetros: largura do filamento depositado, temperatura de extrusão, espessura de camada, velocidade de preenchimento, percentagem de preenchimento e número de perímetros. O modelo CAD utilizado foi um cubo com 10mm de lado, de forma a reduzir o tempo

despendido na obtenção das amostras necessárias à validação do estudo e facilitar a obtenção das medições necessárias. O material utilizado neste estudo foi o PLA. Concluíram que os parâmetros que apresentavam maior influência foram a velocidade de preenchimento e o número de perímetros utilizados, devendo ambos os parâmetros serem definidos em valores reduzidos para a obtenção dos melhores resultados.

Alafaghani *et al.* (2017) estudaram a influencia dos parâmetros de impressão quer nas propriedades mecânicas das peças obtidas quer na precisão dimensional das mesmas. Para tal, imprimiram diversos provetes para ensaios à tração, do tipo *dog-bone* segundo a norma ASTM D638 (2014). O estudo englobou seis parâmetros diferentes: orientação de construção, percentagem de preenchimento, velocidade de preenchimento, temperatura de extrusão, espessura de camada e estratégia de preenchimento. Foram efetuadas 3 medições para cada dimensão em estudo, de forma a definir a precisão dimensional de cada condição. Após tratamento dos dados obtidos, foi definido que os parâmetros que teriam maior influência na precisão dimensional seriam a orientação de construção, temperatura de extrusão e espessura de camada. É ainda sugerido pelos autores que, para uma maior precisão dimensional, as dimensões mais críticas deveriam estar num plano paralelo ao plano de construção da peça.

Por ultimo, o estudo de Santana, Lino Alves e da Costa Sabino Netto (2017) analisou a influencia dos parâmetros espessura de camada, densidade de preenchimento, velocidade de preenchimento, temperatura de extrusão e multiplicador de extrusão na impressão de um cubo com 15 mm de lado em PLA. Este estudo foi dividido em duas fases em que na primeira foram estudados os parâmetros espessura de camada, densidade de preenchimento e velocidade de preenchimento e uma segunda onde foi estudada a temperatura de extrusão e multiplicador de extrusão.

Da primeira fase do estudo verificou-se que as peças com valores dimensionais mais afastados dos pretendidos foram as impressas com uma densidade de preenchimento de 100%. Tais variações encontram-se representadas na Figura 31 (a).

Na segunda fase do estudo observaram-se a influencia do multiplicador de extrusão e temperatura de extrusão. Conclui-se que o multiplicador de extrusão é altamente influente nas dimensões obtidas visto que regula a quantidade de material depositada na peça. Quando está regulado para o valor 1, como é o caso da primeira fase do estudo, a quantidade de material depositada é superior à necessária, e que quando este parâmetro se encontra regulado para 0,5, como é o caso apresentado na Figura 31 (b), a quantidade de material extrudida é inferior à necessária. Os autores recomendam a utilização de um valor de 0,9 para este parâmetro, no caso apresentado neste estudo.

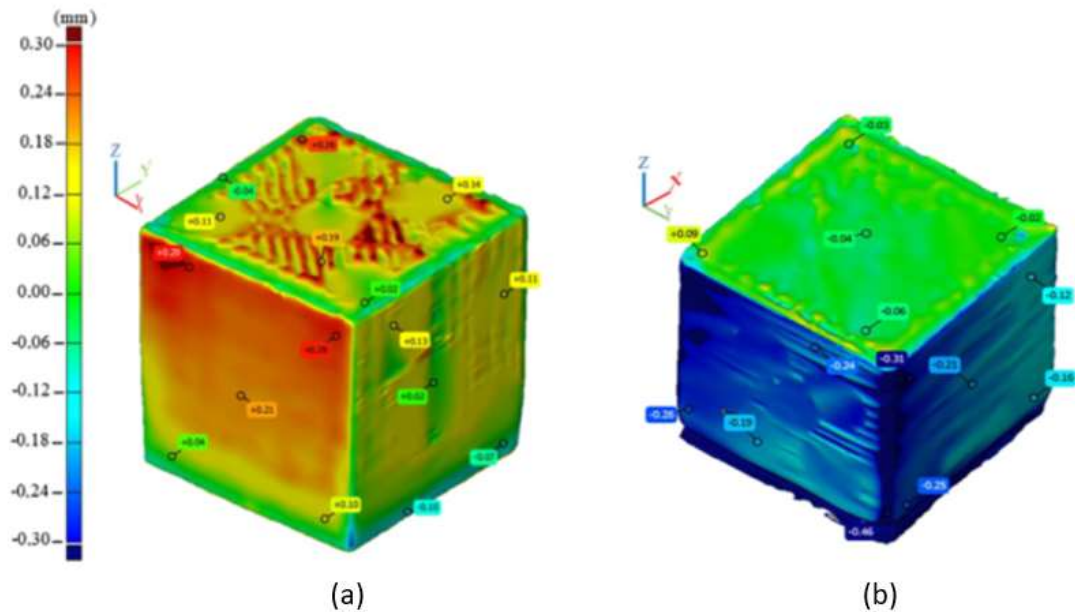


Figura 31 - Variações dimensionais com a condição com 100% de percentagem de preenchimento (a) e com multiplicador de extrusão igual a 0,5 (b) (Adaptado de Santana, Lino Alves e da Costa Sabino Netto (2017)).

Pela análise dos artigos anteriormente listados, é possível concluir que são diversos os parâmetros que afetam a qualidade dimensional das peças obtidas sendo que para se obter peças com acabamentos superficiais satisfatórios e boa precisão dimensional é necessário que os parâmetros influentes estejam bem definidos, nomeadamente a espessura de camada, orientação de construção, velocidades de deposição e número de perímetros.

2.3.3 Características Mecânicas

Uma das principais limitações da tecnologia FDM trata-se das fracas propriedades mecânicas das peças obtidas por esta técnica quando comparadas com peças injetadas. De forma a minimizar esta limitação, a otimização de parâmetros de forma a melhorar as propriedades mecânicas trata-se de um campo de pesquisa de elevada importância (Huang *et al.* 2019). Como tal, tem sido alvo de desenvolvimento, tendo sido publicados diversos trabalhos que abordam esta temática.

Neste subtópico, tal como no anterior, irão ser listados na Tabela 4, os artigos analisados sobre esta questão, sendo posteriormente abordadas com maior profundidade as conclusões dos mesmos.

Tabela 4 – Artigos que analisam características mecânicas.

Referência	Característica Estudada	Parâmetros Estudados	Parâmetros Significantes
Samykano <i>et al.</i> (2019)	Tensão de rutura, módulo de Young, tensão limite elástico, dureza, alongamento máximo	Espessura de camada, ângulo de preenchimento, percentagem de preenchimento	Todos os estudados
Subramaniam <i>et al.</i> (2019)	Tensão de rutura, módulo de elasticidade, tensão limite elástico	Ângulo de preenchimento, percentagem de preenchimento	Todos os estudados
Deng <i>et al.</i> (2018)	Tensão de rutura, módulo de Young, alongamento	Velocidade de preenchimento, espessura de camada, temperatura de extrusão, percentagem de preenchimento	Todos os estudados
Chacón <i>et al.</i> (2017)	Tensão de rutura, resistência à flexão	Orientação de construção, espessura de camada	Todos os estudados

Continua

Tabela 4 – Artigos que analisam características mecânicas (continuação).

Liu <i>et al.</i> (2017)	Resistência à tração, resistência à flexão, resistência ao impacto	Orientação de construção, espessura de camada, estratégia de deposição, largura do filamento depositado, espaçamento entre filamentos de preenchimento	Orientação de construção, espessura de camada, estratégia de deposição
Raut <i>et al.</i> (2014)	Resistência à tração, resistência à flexão	Orientação de construção	Orientação de construção
Mishra e Mahapatra (2014)	Resistência à tração	Nº de perímetros, espessura de camada, largura do filamento depositado, orientação de construção, ângulo de preenchimento, espaçamento entre filamentos de preenchimento	Espaçamento entre filamentos, espessura de camada, orientação de construção

No estudo desenvolvido por Samykano *et al.* (2019), foi estudada a influência dos parâmetros espessura de camada, ângulo de preenchimento e densidade de preenchimento nas propriedades mecânicas das peças obtidas. Para tal, foram impressos diversos provetes de tração, segundo a norma ASTM D638 (2014), utilizando como material o ABS. Foram definidos três níveis para cada parâmetro em estudo: o ângulo de preenchimento variava entre 45°, 55° e 65°, a espessura de camada tinha valores de 0,35mm, 0,4mm e 0,5mm, e a densidade de preenchimento variava entre 40%, 60% e 80%. Os provetes foram submetidos a ensaios de tração sendo retirados valores relativos à tensão de limite elástico, tensão de ruptura, módulo de Young, dureza e alongamento máximo. Na Figura 32 é possível encontrar um exemplo de um provete ensaiado bem como uma análise mais detalhada da sua superfície de ruptura.

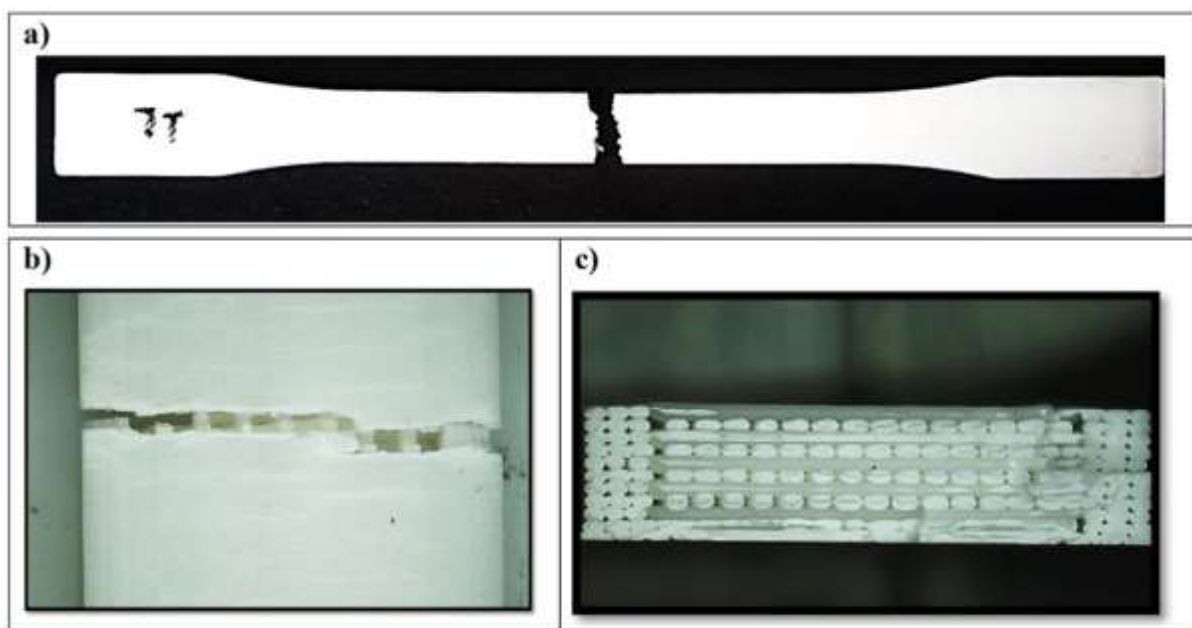


Figura 32 - Exemplo de provete submetido a ensaio à tração (a), imagem de microscopia ótica da zona fraturada (b) e imagem de microscopia da camada fraturada (c) (Samykanó *et al.* 2019).

Relativamente à tensão de rutura do material, os parâmetros definidos como influentes foram a espessura de camada e a percentagem de preenchimento, sendo esta influência determinada com recurso a análises de variância dos valores resultantes dos ensaios. No caso do módulo de Young, foi igualmente verificado que os parâmetros percentagem de preenchimento e espessura de camada teriam efeito consideravelmente relevante. Ao nível da tensão de limite elástico, os parâmetros ângulo de preenchimento e densidade de preenchimento foram os que mais afetavam o seu valor enquanto que ao nível do alongamento máximo o único parâmetro considerado influente foi a densidade de preenchimento. Os autores determinaram ainda que a melhor condição estudada foi construída com uma espessura de camada de 0,5mm, ângulo de preenchimento de 55° e densidade de preenchimento de 80%.

Subramaniam *et al.* (2019) estudou a influência do ângulo de preenchimento e da densidade de preenchimento nos valores da tensão de limite elástico, módulo de Young e tensão de rutura. A análise foi efetuada em provetes impressos em PLA, sendo a variação dos parâmetros realizada em 3 níveis diferentes, com os valores 40°, 60° e 80° para o ângulo de preenchimento e de 20%, 50% e 80% para a densidade de preenchimento.

No que diz respeito à densidade de preenchimento, os autores constataram que todas as propriedades em estudo melhoravam consideravelmente com o aumento do valor deste parâmetro. Tal pode ser explicado com o aumento do material disponível para responder aos esforços, o que leva a uma maior resistência dos mesmos.

No que toca ao ângulo de preenchimento, o trabalho permitiu concluir que os melhores valores seriam os mais extremos, isto é, as inclinações de 40° e 80°, visto que resulta em valores de resistência mecânica superiores. Este fenómeno pode ser explicado com o alinhamento do filamento depositado com a direção do esforço ao qual a peça é sujeita. Outra explicação referida pelos autores trata da dimensão nominal do filamento depositado que, com estes

ângulos de preenchimento, toma valores superiores aos da inclinação intermédia. Ao ter valores superiores, os filamentos aumentam a sua capacidade de acumulação de tensões, o que resulta em peças mais resistentes.

O estudo desenvolvido por Deng *et al.* (2018) analisou a influência dos parâmetros velocidade de preenchimento, espessura de camada, temperatura de extrusão e densidade de preenchimento nas características mecânicas de provetes para ensaios de tração, utilizando o PEEK como material de construção. Dos ensaios realizados, os valores obtidos analisados foram a tensão de rutura, modulo de Young e o alongamento.

No que se refere aos parâmetros em estudo, os valores definidos variaram em 3 níveis: a velocidade de preenchimento seguia valores de 20, 40 e 60 mm/s, a espessura de camada tinha valores de 0,20 mm, 0,25 mm e 0,30 mm, a temperatura de extrusão variava entre 350°C, 360°C e 370°C e a densidade de preenchimento adotaria valores de 20%, 40% ou 60%.

Na Figura 33 é possível observar duas imagens de microscopia eletrônica da superfície fraturada de dois provetes diferentes, sendo visível a influência dos parâmetros tanto na superfície lateral como na superfície de fratura obtida. Nela são apresentadas duas condições distintas de impressão, sendo as imagens (a) e (b) referentes à condição impressa com 20mm/s de velocidade de preenchimento, 0.20mm de espessura de camada, 370°C de temperatura de extrusão e 40% de densidade de preenchimento, designada por condição 1. Por sua vez, as imagens (c) e (d) são referentes à condição 2, impressa com 40mm/s, 0.20mm de espessura de camada, 360°C de temperatura de extrusão e 60% de densidade de preenchimento.

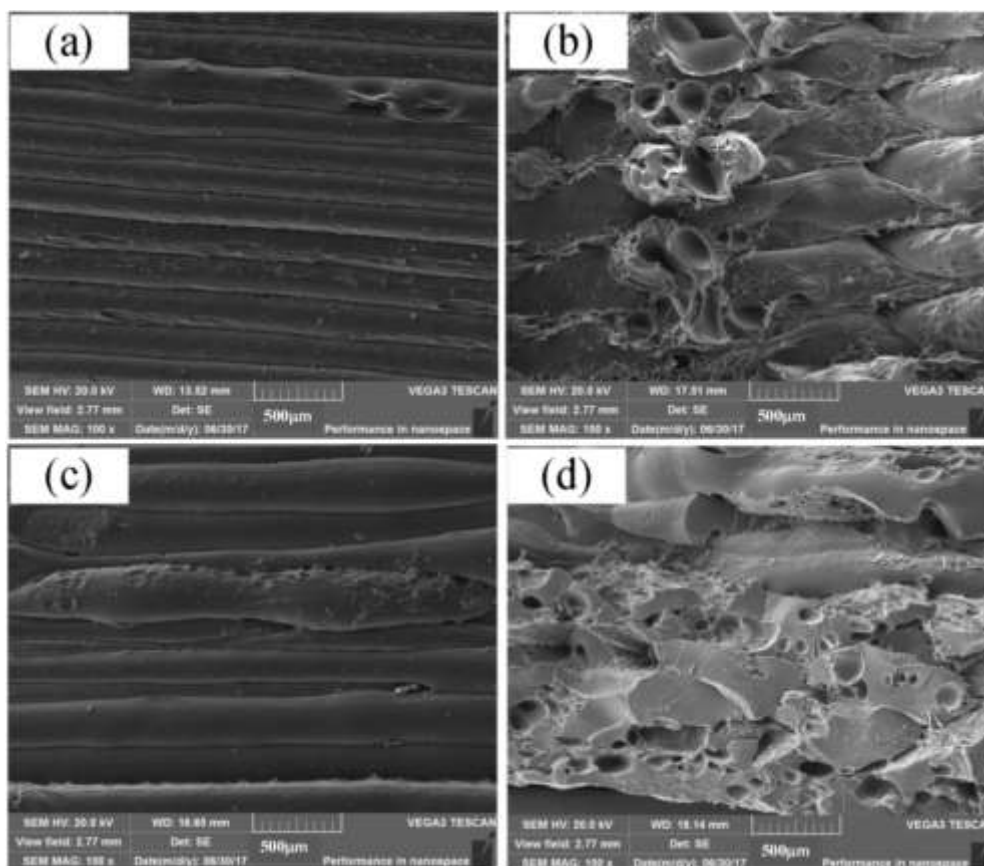


Figura 33 - Imagens de microscopia eletrônica da fratura dos provetes impressos com a condição 1, lateral (a) e frontal (b), e com a condição 2, lateral (c) e frontal (d) (Deng *et al.* 2018).

Relativamente à velocidade de preenchimento, os autores concluíram que os valores que mais favoreciam as propriedades mecânicas seriam valores mais intermédios, entre os valores definidos para o estudo. À velocidade de 20 mm/s verificou-se que a quantidade de material extrudida seria superior à esperada, resultando assim em deposição excessiva e em problemas relativamente à fusão entre o material depositado e o material existente. No entanto, à velocidade de 60 mm/s o filamento depositado não teria tempo suficiente para solidificar corretamente, afetando assim a qualidade das ligações entre filamentos depositados e, por consequência, as propriedades mecânicas das peças obtidas.

A respeito da temperatura de extrusão, os autores concluíram que se esta for demasiado elevada poderia levar à degradação do material base, prejudicando as propriedades mecânicas do mesmo, e até levar a fenómenos de extrusão excessiva. Se este parâmetro for definido para um valor mais reduzido, o material pode não fluir corretamente, levando a entupimentos do sistema extrusor.

A espessura de camada afeta a largura e espessura do material depositado, o que influencia os fenómenos de ligação entre camada e por consequência as propriedades mecânicas das peças obtidas.

A percentagem de preenchimento tem influência na quantidade de material presente nas secções do material, tendo por essa razão influência na resistência da peça.

Os autores chegaram também a combinações diferentes de parâmetros que favorecem as propriedades em estudo. No que toca à tensão de rutura, os valores de 60 mm/s para a velocidade de preenchimento, espessura de camada de 0,25 mm, temperatura de extrusão de 370°C e percentagem de preenchimento de 60% verificaram-se os mais favoráveis. Para o alongamento, velocidade de 20 mm/s, espessura de camada de 0,25 mm, temperatura de 370°C e 40% de percentagem de preenchimento foi a melhor condição. Por fim, ao nível do módulo de Young, velocidade de 60 mm/s, espessura de camada de 0,2 mm temperatura de 360°C e percentagem de preenchimento de 60% definiram-se como os valores recomendados.

No trabalho de Chacón *et al.* (2017) foi estudada a influência da orientação de construção e espessura de camada em provetes de PLA ensaiados à tração. A orientação de construção variou em 3 níveis diferentes: construção vertical à plataforma de construção, horizontal e paralela. A espessura de camada variou em 4 níveis, sendo eles 0,06mm, 0,12mm, 0,18mm e 0,24mm.

Relativamente à orientação de construção, os autores concluíram que esta afeta significativamente as propriedades mecânicas das peças obtidas, em particular a ductilidade e resistência à fratura. As peças obtidas nas orientações paralela e horizontal demonstraram uma resistência à e à flexão superiores, quando comparadas com as obtidas nas peças construídas na orientação vertical.

A diferença anteriormente descrita pode ser explicada através de dois tipos de falhas verificadas nos provetes: as falhas intracamadas e intercamadas. Quando a peça é obtida na orientação vertical, a tensão foi aplicada num plano perpendicular à direção das suas fibras e paralelo ao plano de deposição de camadas, incorrendo em falhas intercamadas, cuja força de ligação é significativamente menor do que a gerada intracamada. Nas restantes orientações, verificou-se o caso contrário, sendo as ligações intracamadas as mais esforçadas, justificando assim a diferença de valores observada entre as condições.

Na Figura 34 é possível observar as diferenças na superfície de fratura com a variação da orientação de construção.

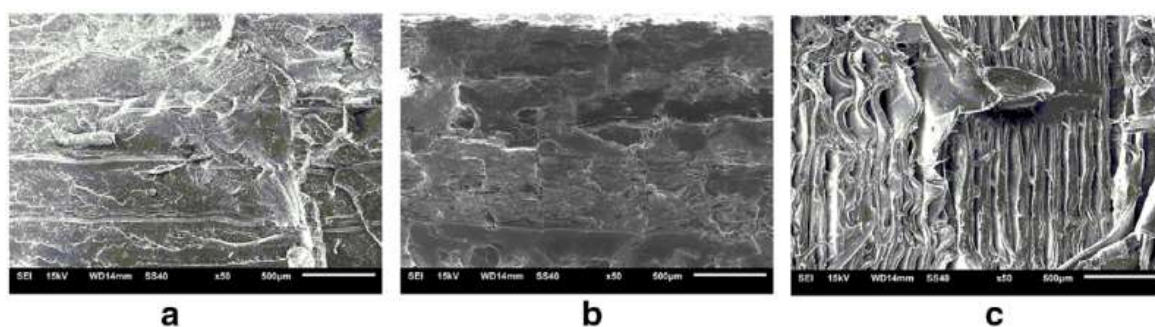


Figura 34 -Imagem de microscopia eletrônica da zona de fratura de provetes impressos com espessura de camada de 0,06mm e velocidade de preenchimento de 20 mm/s, na orientação vertical (a), paralela (b) e horizontal (c) (Chacón *et al.* 2017).

No que toca à espessura de camada, houve uma certa disparidade de valores, verificando-se evoluções diferentes quando existia variação da orientação de construção. Quando a orientação de construção definida era a vertical, foi verificado que um aumento de espessura de camada resultaria em melhores propriedades mecânicas. Tal pode ser explicado com a redução do número de camadas necessárias para contruir a peça, o que resulta em menores fragilidades associada às ligações entre camadas. No entanto, quando as peças eram obtidas nas orientações horizontal e paralela verificou-se o fenómeno contrário, havendo uma deterioração das propriedades mecânicas com o aumento da espessura de camada. É ainda referido pelos autores que o efeito da variação da espessura de camada tem repercussões bastante menores ao nível das propriedades mecânicas quando comparado com a variação de orientação de construção.

Liu *et al.* (2017) estudaram a influência dos parâmetros orientação de construção, espessura de camada, estratégia de deposição, largura do filamento depositado e espaçamento entre os filamentos de preenchimento nas propriedades mecânicas de peças obtidas em PLA. Concluiu que, de entre os selecionados, a orientação de construção, espessura de camada e estratégia de deposição seriam os parâmetros mais influentes.

No caso da resistência à tração, os parâmetros considerados mais relevantes foram a orientação de construção, espessura de camada e estratégia de deposição. Os mesmos parâmetros também se verificaram influentes no caso da resistência à flexão. No que toca à resistência ao impacto apenas a orientação de construção e espessura de camada foram considerados expressivos.

Raut *et al.* (2014) estudaram a influência da orientação de construção em provetes impressos em ABS. Neste estudo, além da análise às propriedades mecânicas foram também analisados fatores associados ao custo de obtenção da peça.

Os autores concluíram que uma rotação do provete 0° em torno do eixo Y foi a orientação que obteve melhores valores de resistência à tração e custo de obtenção reduzido. No caso da resistência à flexão, os melhores resultados foram obtidos com uma inclinação de 0° em torno do eixo X e com um custo de obtenção de peça médio.

Por fim, Mishra e Mahapatra (2014) analisaram a influencia do numero de perímetros, espessura de camada, largura do filamento depositado, orientação de construção, ângulo de preenchimento e espaçamento entre filamentos de preenchimento na resistência à tração de peças construídas em ABS.

Verificaram que a resistência à tração aumentava com o aumento do número de perímetros, justificando este fenómeno através da mudança da zona de concentração de tensões da periferia da peça para zonas mais interiores da mesma. Esta resistência também aumentava com o aumento da espessura de camada, pelas mesmas razões definidas por Chacón *et al.* (2017) e aumentava com a redução do espaçamento entre filamentos depositados, visto que as ligações de filamentos no interior de cada camada se verificavam mais fortes e coesas.

Dos artigos anteriormente descritos é possível concluir que uma multiplicidade de fatores influenciam as características mecânicas das peças obtidas, sendo fulcral para a funcionalidade das peças obtidas a correta definição dos parâmetros.

2.4 Fabrico Aditivo de Parafusos

Na atualidade, a utilização de parafusos e porcas, tais como outros tipos de peças, obtidos por FA encontra-se restrito a indústrias de alta tecnologia, das quais são exemplo a aeronáutica, biomédica e robótica. No caso destes elementos, tal deve-se ao facto de não ser economicamente viável para a maioria das indústrias a produção dos mesmos através destes métodos de fabrico. No entanto, tal produção pode trazer vantagens ao nível do *design* destes componentes, o que permite potenciar as suas características de funcionalidade em certas aplicações (Goulding 2017).

Na indústria aeroespacial, as tecnologias de FA estão a ser utilizadas para fabricar juntas e parafusos que permitam novas aplicações. Atualmente a *Airbus* encontra-se a desenvolver um tipo de tecnologia de fixação, chamado “*hyper joining*”, que é seis a sete vezes mais resistente que uma junta convencional e que garante uma menor coeficiente de arrasto, gerando assim uma poupança de combustível (Goulding 2017).

Na indústria biomédica, o FA está a ser utilizado para desenvolver os chamados *Unthreaded Expandable Fasteners* (UEF), exemplificado na Figura 35, sendo este tipo de parafusos utilizados para a estabilização da cervical posterior e fabricados com recurso a SLM. A utilização deste componente reduz o risco associado a implementação do mesmo e apresenta melhores características mecânicas do que os métodos utilizados convencionalmente (Oldakowski et al. 2016).



Figura 35 - Exemplo de UEF fabricado por FA (Adaptado de Oldakowski et al. (2016).

Outra aplicação em que também está a ser estudada a aplicabilidade dos processos de FA é na construção de parafusos para infraestruturas metálicas. Tal permite uma redução de custos ao nível da montagem dos componentes e uma redução do tempo da mesma (Goulding 2017).

Em suma, existem diversas indústrias interessadas em desenvolvimentos na área da produção de parafusos e porcas por FA, em deterioramento dos processos convencionais, visto que este tipo de processamento traz inúmeras vantagens para os intervenientes.

3 Materiais e Métodos

3.1 Material

O material utilizado no processo experimental deste estudo foi o Ácido Polilático (PLA). Trata-se de um material bastante utilizado devido à sua alta fluidez durante a extrusão e baixa contração, quando comparado com os restantes termoplásticos utilizados em FDM, o que permite obter peças com boa precisão dimensional, com fidelidade de detalhes e bom acabamento superficial. É um termoplástico bastante rígido e resistente, difícil de deformar ou flexionar, sendo indicado para a produção de protótipos que não sejam submetidos a grandes esforços mecânicos, atrito ou altas temperaturas (Relvas 2018).

O PLA é um termoplástico sintético criado a partir de recursos renováveis, como o amido de milho e material vegetal. Tipicamente este material é utilizado em embalagens biodegradáveis, sacos plásticos, implantes médicos, embalagens para alimentos e bebidas, vestuário e fraldas (Granta 2018).

O material utilizado neste estudo foi fornecido pela RepRap.pt, apresentado na Figura 36, e tem as propriedades listadas na Tabela 5 .

Tabela 5 - Propriedades do PLA RepRap.pt.

Propriedade Física	PLA	Método de teste (ASTM)
Peso específico [g/cm ³]	1,24	D792
Viscosidade Relativa ³	4,0	D5225
Temperatura de fusão [°C]	145-160	D3418
Temperatura de transição vítrea [°C]	55-60	D3418
Propriedades Mecânicas		
Continua		

³ Viscosidade relativa medida a 1g/dL de clorofórmio a 30°C.

Tabela 5 - Propriedades do PLA RepRap.pt (continuação).		
Tensão de Limite Elástico [MPa]	60	D882
Tensão de Rutura [MPa]	53	D882
Módulo de Young [GPa]	3,6	D882
Extensão após rutura [%]	6	D882
Resistência à flexão [MPa]	83	D790
Módulo de flexão [MPa]	3,8	D790

Além das características referidas anteriormente, o PLA apresenta grande facilidade de processamento devido à temperatura de extrusão e de transição vítrea relativamente baixas (Subramaniam *et al.* 2019; El Magri *et al.* 2019). Para o material adquirido, o fabricante recomenda uma temperatura de extrusão de 190°C a 230°C e uma temperatura da plataforma de construção de 50°C a 70°C.

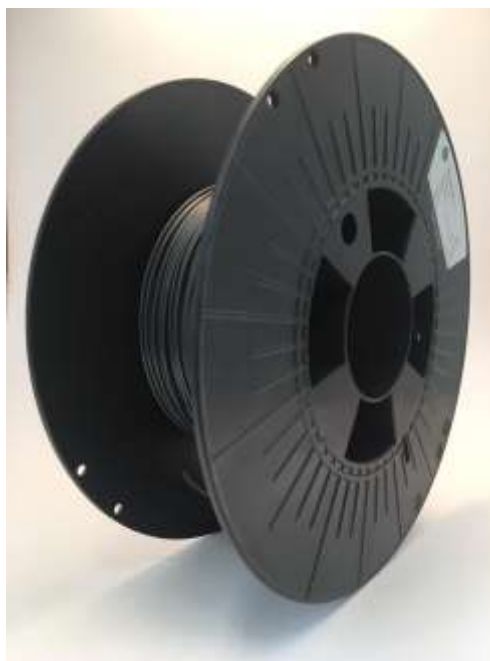


Figura 36 – Filamento de PLA utilizado no estudo.

Mais informações referentes às propriedades mecânicas e ao perfil térmico do filamento podem ser encontradas no Anexo A.

3.2 Software

No decorrer deste trabalho foram utilizados dois softwares diferentes para adaptar os ficheiros CAD para o processo de FDM. O *Meshmixer*® foi o software de verificação de modelos STL e o *Slic3r Prusa Edition*® foi o utilizado para fatiar os ficheiros STL.

3.2.1 Meshmixer®

O *Meshmixer*® é um *software* de acesso gratuito, fornecido pela *Autodesk*®, direcionado para a criação e manipulação de malhas triangulares e ficheiros tridimensionais, complementado com ferramentas especializadas para preparação de ficheiros de FA.

Na Figura 37 é apresentada a interface deste software. Nela pode-se verificar a existência de diversos componentes que permitem a análise e edição do ficheiro inserido.

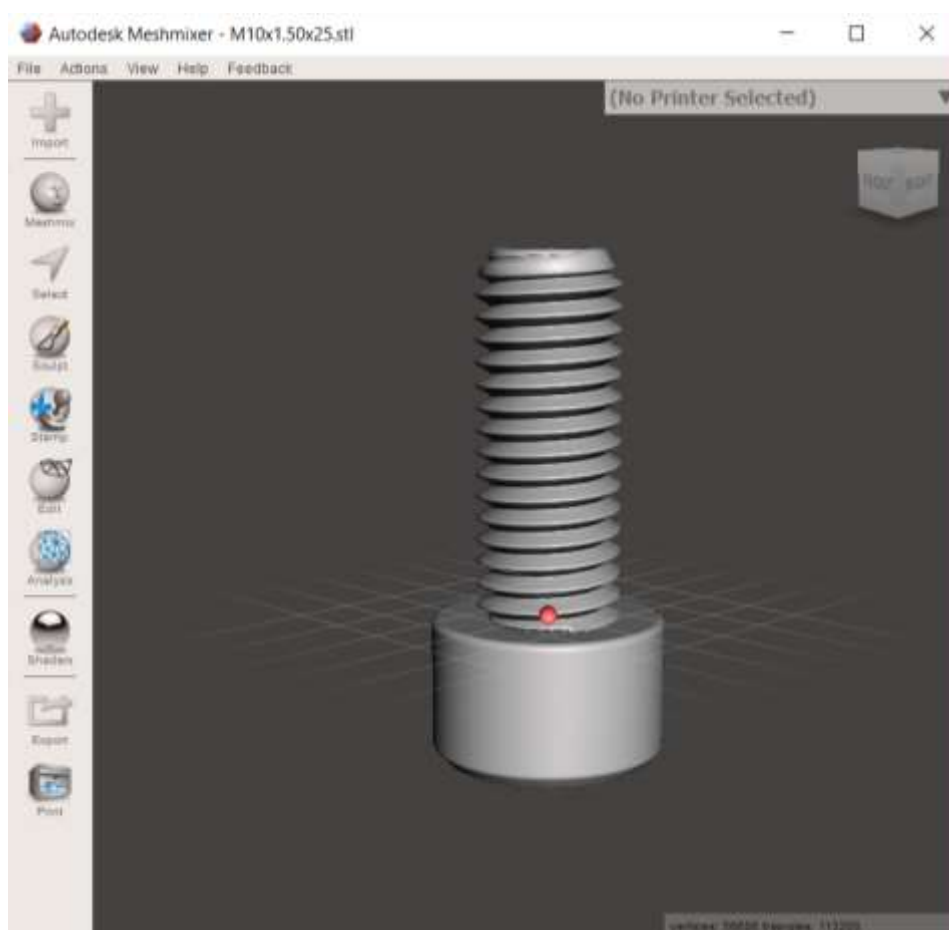


Figura 37 - Interface do software *Meshmixer*®.

Na lateral esquerda da interface é possível observar as diversas ferramentas que o *software* faculta, sendo as mesmas organizadas por grupos de funções. A utilização deste software revelou-se particularmente útil para o presente trabalho na análise da estabilidade dos modelos e geração de estruturas de suporte, estando ambas as funcionalidades associadas ao grupo *Analysis*.

Na Figura 38 é demonstrada a aplicação da ferramenta de geração de suportes que analisa a estabilidade da peça e adiciona automaticamente os suportes necessários. Tal processo é feito através da ferramenta *Overhangs*.

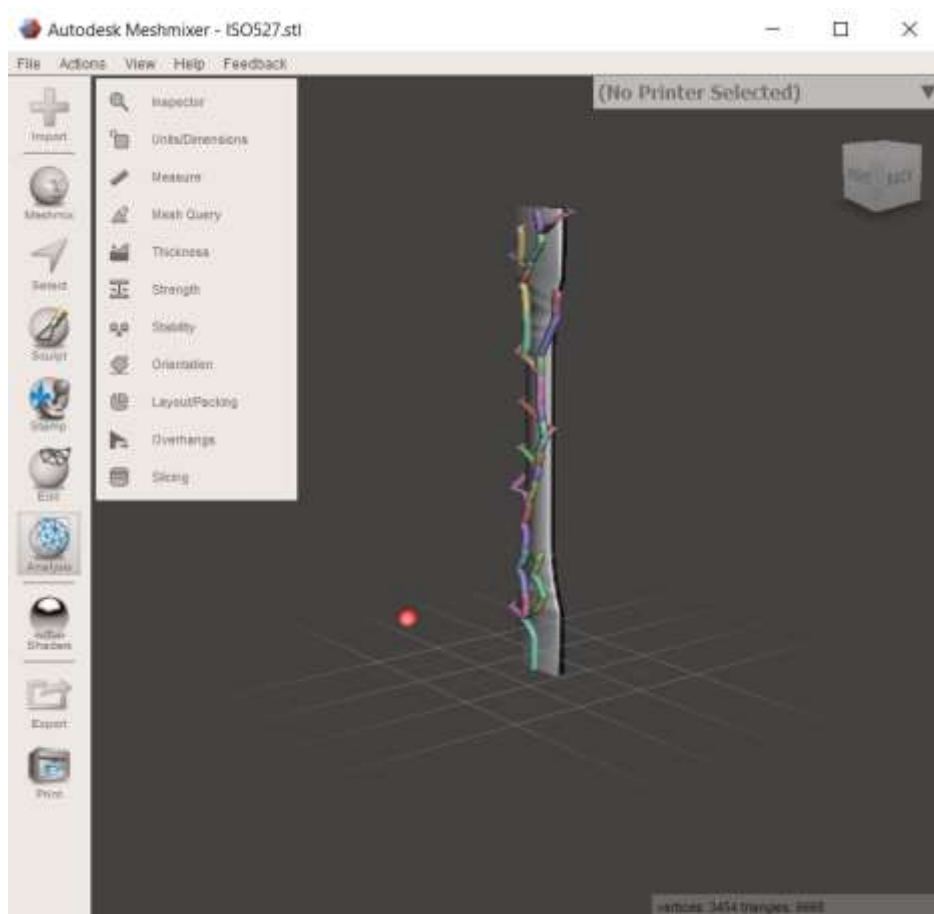


Figura 38 - Geração de suporte num provete ISO 527 no *Meshmixer*®

3.2.2 Slic3r Prusa Edition®

Uma vez obtido o ficheiro STL é necessário um programa que faça o fatiamento do modelo e que defina o processo de impressão. Tal processo é definido através do ficheiro *G-code* que posteriormente é enviado para o equipamento de impressão (González 2016).

No presente trabalho, o *software* de fatiamento utilizado foi o *Slic3r Prusa Edition*® 1.41.3, uma variação do *Slic3r* que se trata de um *software* do tipo *open source*, sendo um dos mais utilizados em Impressão 3D (Ranellucci 2013), sendo apresentada a sua interface na Figura 39.

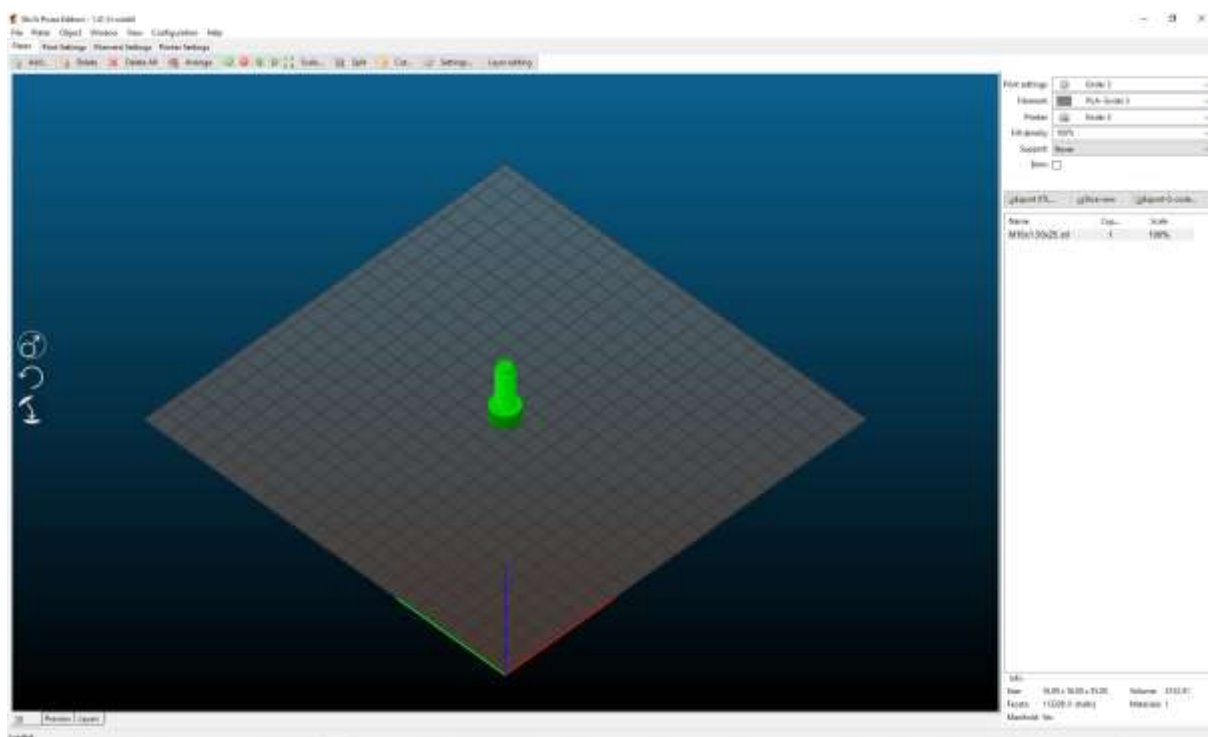


Figura 39 - Interface do *software Slic3r Prusa Edition*®.

De notar que no canto superior esquerdo do mesmo é possível encontrar três abas diferentes: *Print Settings*, *Fillament Settings* e *Printer Settings*. Estas abas, tal como o nome indica, possibilitam a alteração de parâmetros relacionados com a própria impressão, com o filamento utilizado e realizar ajustes para o equipamento a controlar.

Na aba *Print Settings* é possível regular parâmetros relacionados com a impressão, tais como a espessura de camada, densidade de preenchimento, ângulo de preenchimento, velocidades de preenchimento, número de perímetros, entre outros. Na *Fillament Settings* é possível alterar parâmetros relacionados com o material utilizado tais como a temperatura de extrusão, temperatura da plataforma de construção e multiplicador de extrusão. Por fim, na aba *Printer Settings* é possível alterar parâmetros relacionados com o equipamento como as dimensões da plataforma de construção, a altura máxima de impressão permitida e até incluir modificações específicas a introduzir no *G-code*.

Após adicionar o ficheiro STL e definir os parâmetros a utilizar, o software gera uma pré-visualização do fatiamento. Esta pode ser vista a nível global, como pode ser observado na Figura 40, ou por camadas, como é exemplificado na Figura 41. Por fim, é possível exportar o

G-code que posteriormente é transmitido ao equipamento ou por ligação do computador ao equipamento ou por intermédio de um dispositivo de armazenamento externo.

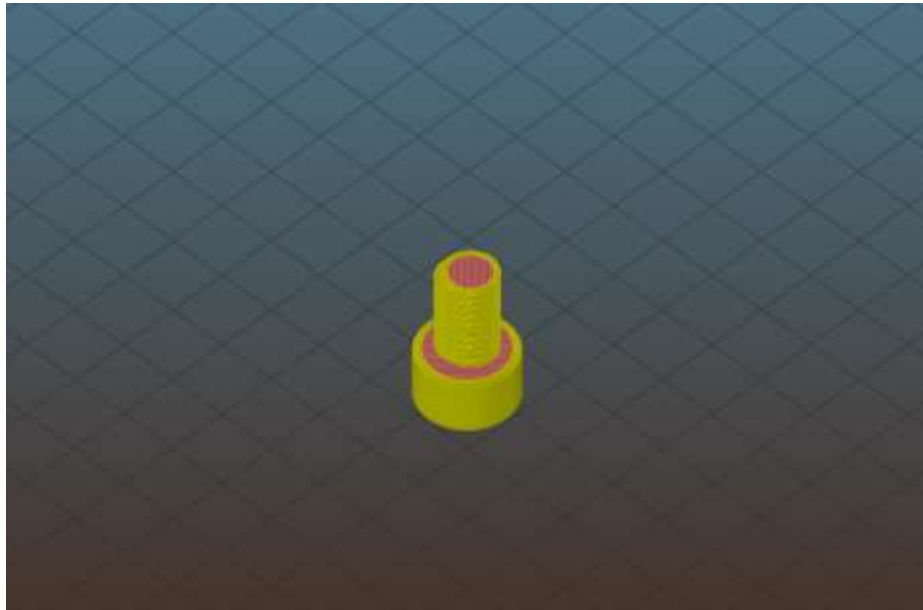


Figura 40 - Pré-visualização do modelo fatiado no software *Slic3r*.

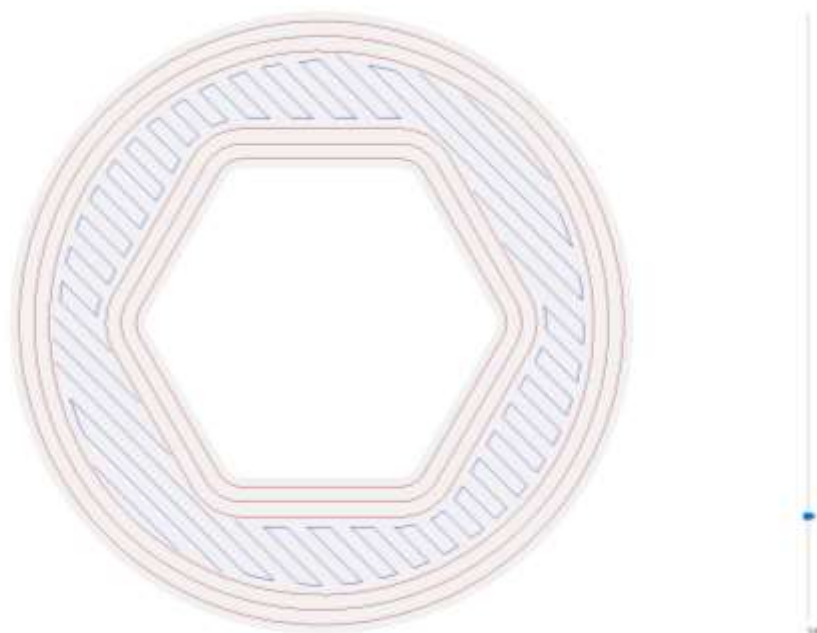


Figura 41 - Pré-visualização por camadas fatiadas no software *Slic3r*.

3.3 Equipamento

3.3.1 Impressora 3D

O equipamento de impressão utilizado no presente estudo foi o modelo *Ender 3* da *Creality3D*. Trata-se de uma impressora FDM, de baixo custo, de código aberto e foi cedida pelo Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços (LDPS) do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP, apresentada na Figura 42.

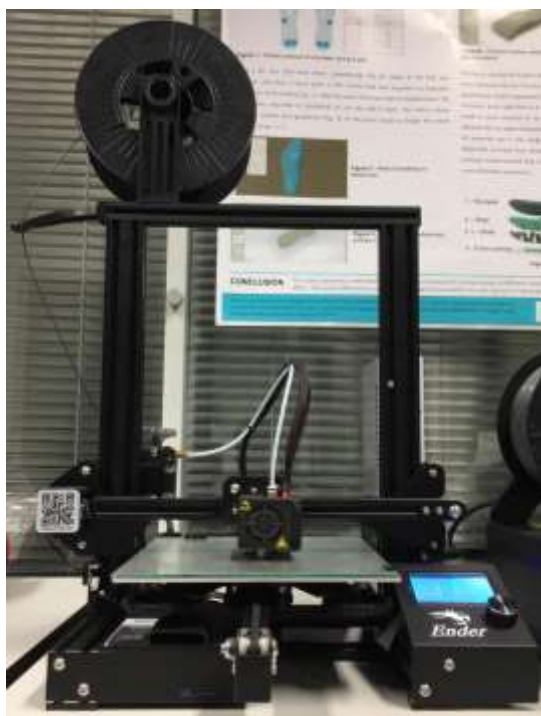


Figura 42 - Impressora 3D utilizada neste trabalho.

As principais características desta impressora encontram-se agrupadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Principais características do equipamento utilizado.

Propriedade	
Modelo	Ender 3
Fabricante	Creality3D
Preço	200€
Temperatura Máxima Extrusor [°C]	255
Temperatura Máxima Plataforma [°C]	110
Velocidade de Deslocação Máxima [mm/s]	180
Dimensões Plataforma [mm]	220x220
Altura Máxima Impressão [mm]	250
Diâmetro do Bico Extrusor [mm]	0,4
Espessura de Camada [mm]	0,1 — 0,4
Filamento	1,75mm PLA, TPU, ABS
Dimensões da Máquina [mm]	440x410x465

O equipamento sofreu algumas alterações iniciais de forma a melhorar certos aspetos da máquina.

A nível de *hardware*, foram feitas algumas alterações e adicionados novos componentes. De notar que alguns dos componentes adicionados foram impressos na própria máquina. Foi impresso e montado um componente que garante o correto guiamento do filamento até ao sistema de extrusão, mantendo um espaçamento entre o filamento e o equipamento e evitando que o ângulo de entrada no sistema de roldanas fosse muito agudo, apresentado na Figura 43. Foi também adicionado um espaçador para a mola do sistema de roldanas, responsável por um aumento de tensão na mesma. Este componente assegura que o funcionamento da máquina, que resulta em ligeiras vibrações, não provoque alterações na tensão aplicada pela mola, sendo o componente adicionado representado na Figura 44. Por fim, foi adicionada uma cobertura para a ventoinha da *motherbord*, o que evita que restos de filamento obstruam a passagem do ar, como visível na Figura 45.

Outro componente que também foi adicionado ao equipamento trata-se de uma placa de vidro para a plataforma de construção. Este componente, visível na Figura 46 é responsável por uma melhor adesão dos filamentos depositados à plataforma de construção.

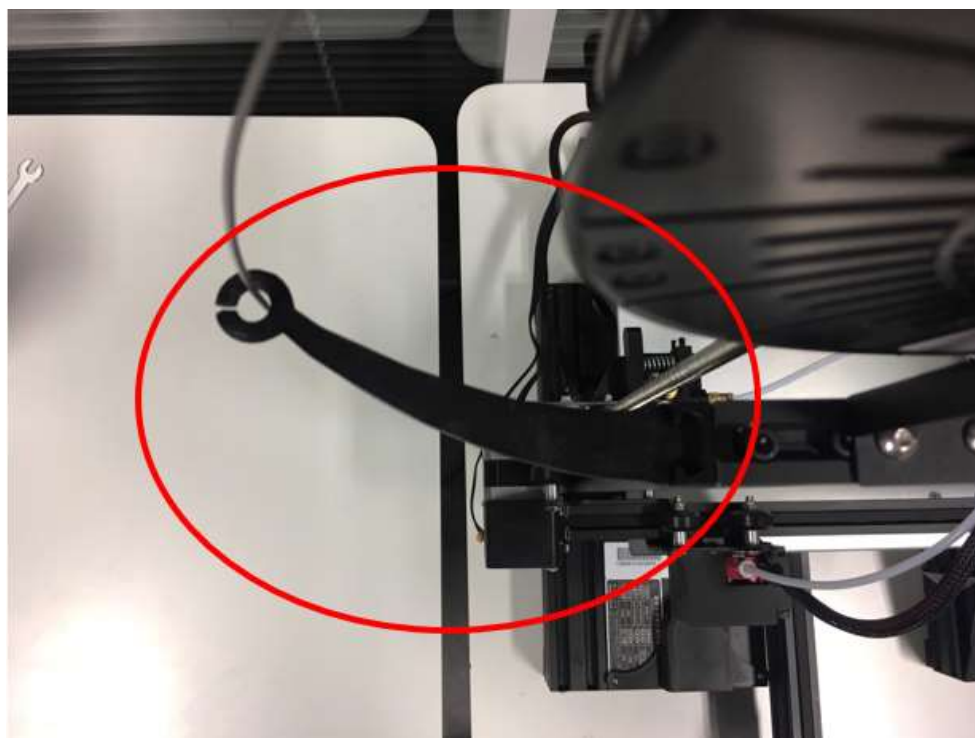


Figura 43 - Componente para o guiamento do filamento.

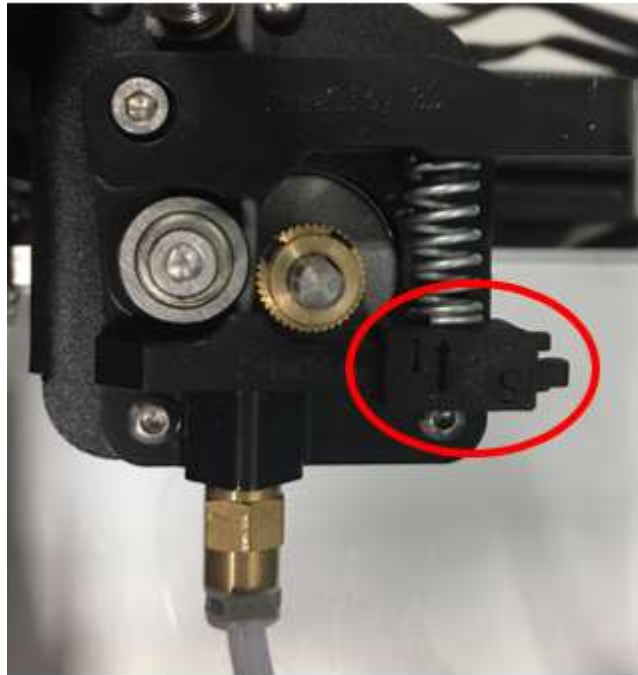


Figura 44 - Componente para o sistema de alimentação.



Figura 45 - Cobertura da ventoinha.

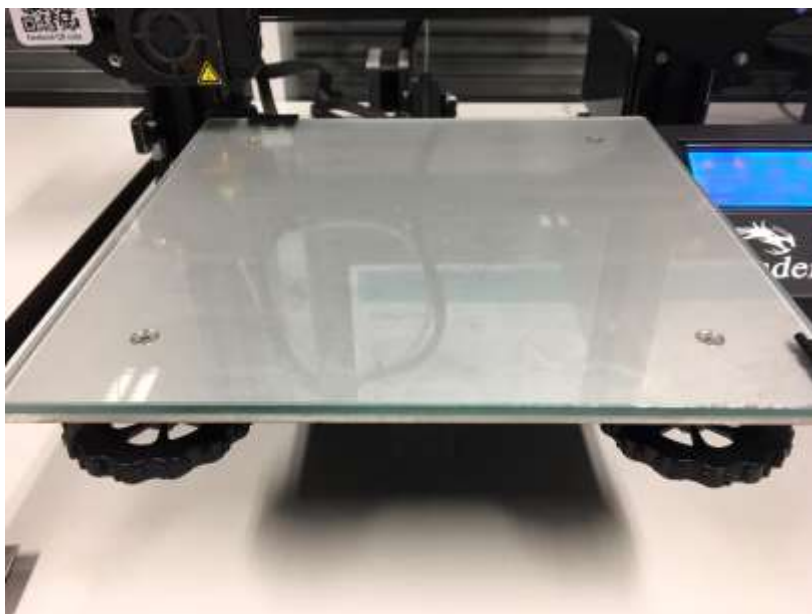


Figura 46 - Vidro para a plataforma de construção.

3.3.2 Procedimento de Calibração

Após montagem do equipamento este foi sujeito a um procedimento de calibração. Tal procedimento é de particular importância uma vez que garante a qualidade e repetibilidade do processo de impressão. Foram alvos de processo de calibração o sistema de extrusão e o sistema de movimentação do equipamento.

(i) Extrusão

De forma a garantir que o equipamento se encontra a extrudir a quantidade de material exata, é necessário calibrar o motor de passo, que por sua vez controla o sistema de roldanas.

A regulação do motor é feita através da alteração do número de passos que este deve rodar por cada milímetro de filamento extrudido. Como tal, é necessário saber qual o valor inicialmente estabelecido, informação que pode ser encontrada no *firmware* da máquina.

Após determinado este valor, é necessário que a máquina extruda uma quantidade exata de material, utilizando o *software Pronterface*, cuja interface se encontra apresentada na Figura 47. Deste modo é possível enviar comandos em *G-code* para o equipamento, sendo necessário comandar a máquina para que esta extruda uma determinada quantidade de material.

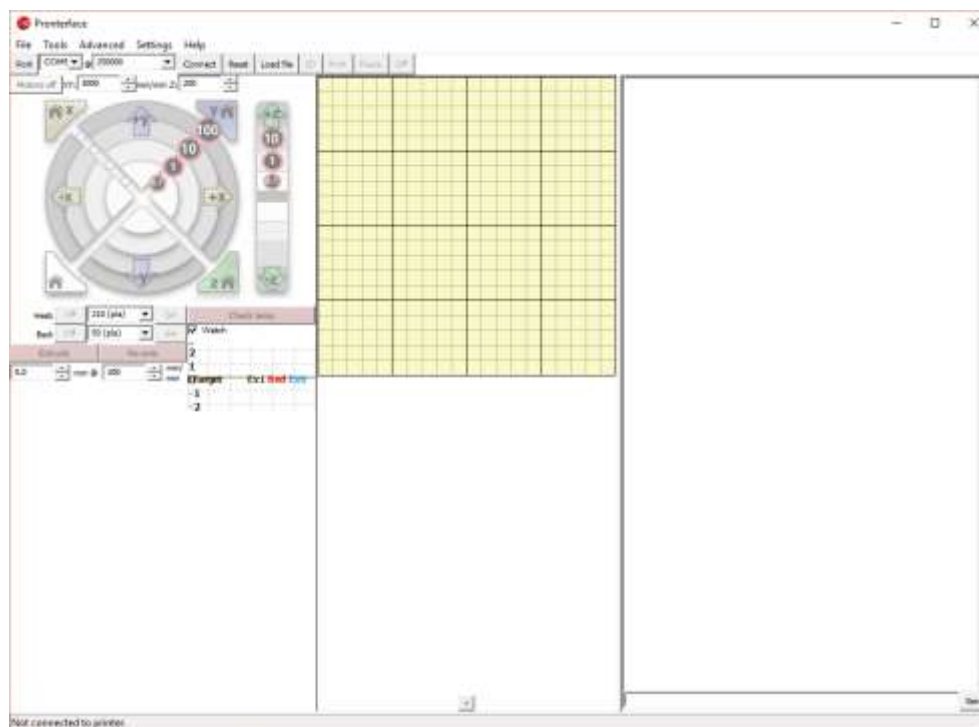


Figura 47 - Interface do *software Pronterface*.

Através deste software, a temperatura do bico extrusor era elevada até aos 200°C, sendo posteriormente introduzido o comando G1 E100 F100. Este último acionava o motor do sistema de extrusão e ordenava a extrusão de 100mm de material a uma velocidade de 100mm/min. Previamente ao acionamento do comando, era efetuada uma marcação no filamento a utilizar, tendo esta sido feita a uma distância de 120mm da entrada do sistema de extrusão. Após ser

extrudido todo o material, a distância da marca à entrada do sistema de extrusão é novamente medida.

Através do processo anteriormente descrito, conjuntamente com a equação 3.1, foi possível regular o número de passos por milímetro do motor de extrusão.

$$N^{\circ} \text{ Passos/mm}_i = \frac{100}{120 - \text{Distância restante [mm]}} \times N^{\circ} \text{ Passos/mm}_{i-1} \quad (3.1)$$

O número de passos obtido através da equação é posteriormente inserido no *firmware* da máquina, substituindo o valor previamente estabelecido. A calibração do número de passos por milímetro do motor trata-se de um processo iterativo que termina quando o comprimento de filamento extrudido é igual à distância inicialmente estabelecida que, no caso apresentado, se tratava dos 100mm.

(ii) Testes

De forma a melhor compreender as capacidades do equipamento e a ajustar o perfil do *software* ao mesmo, foi impresso um conjunto de peças de teste e calibração. Além de garantir que o equipamento e o *software* se encontravam operacionais e a funcionar conforme as especificações, o estudo serviu também para estabelecer um primeiro contacto com o equipamento e auxiliou no desenvolvimento de conhecimento sobre o processo.

Na Figura 48 é possível encontrar um exemplo de peça de teste impressa no decorrer desta fase.



Figura 48 - Exemplo de peça de teste impressa no equipamento.

Tendo sido ultrapassadas todas as fases de calibração do equipamento este foi considerado apto para o início do estudo.

3.4 Metodologia experimental

O estudo apresentado teve como principal objetivo a avaliação da capacidade de um equipamento de impressão 3D de baixo custo na produção de parafusos e porcas. O estudo teve por base a avaliação destes elementos ao nível da precisão dimensional, análise e de massa e resistência mecânica, sendo estudados os parâmetros considerados influentes para cada característica.

O estudo foi dividido em três fases diferentes: estudos iniciais, estudo da orientação de construção e estudo da influência de parâmetros. Todas estas fases bem como as entradas e saídas de cada fase são esquematizadas na Figura 49.

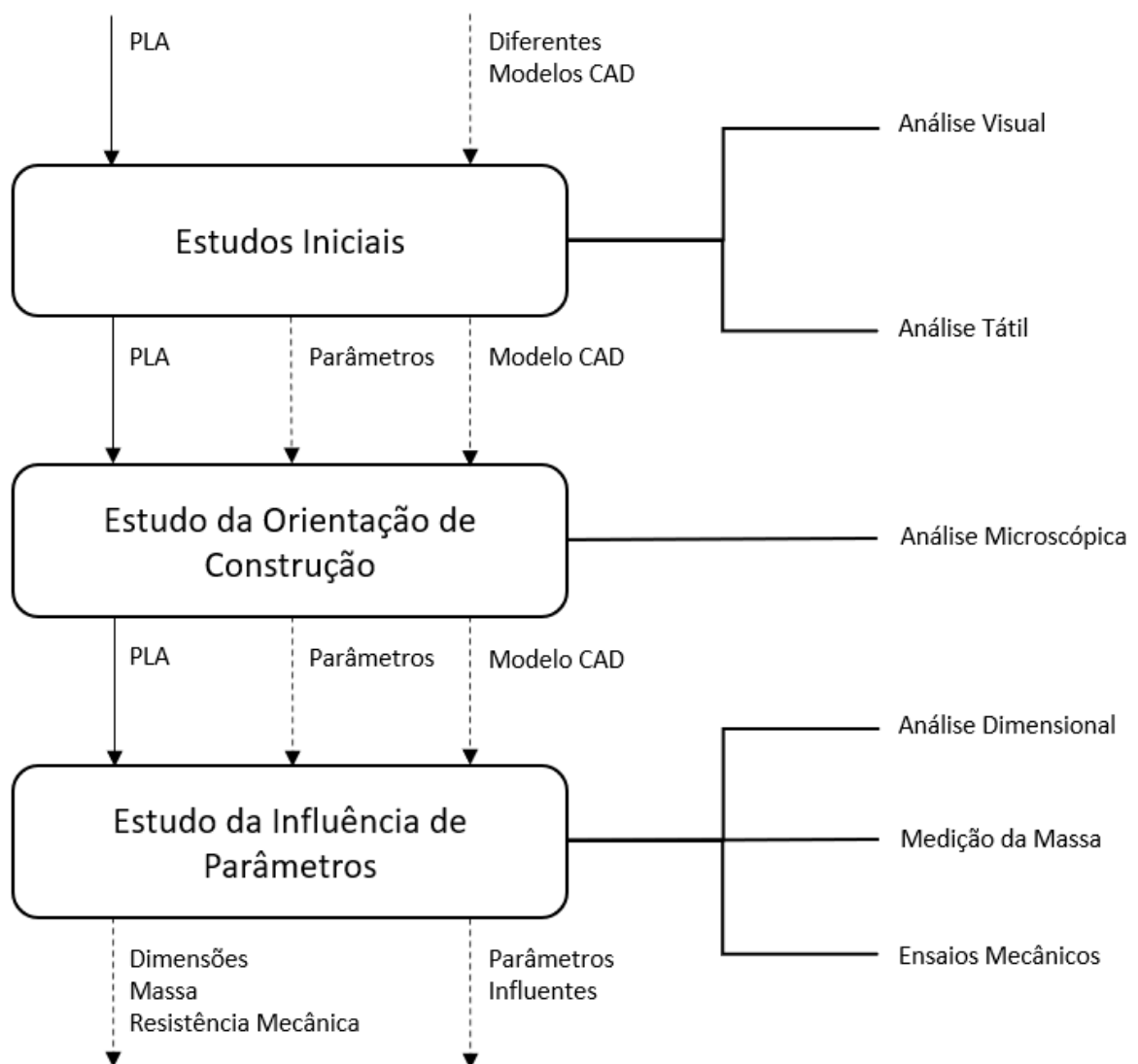


Figura 49 - Diagrama do processo experimental.

As etapas apresentadas no diagrama anterior são descritas em maior detalhe nos subtópicos seguintes.

3.4.1 Estudos Iniciais

Encontrando-se o equipamento operacional e preparado para a realização do estudo, foi iniciado o processo de eleição dos modelos de parafuso e porca sobre os quais o trabalho se iria debruçar. Como tal, foi impresso um conjunto de parafusos e porcas sendo posteriormente avaliados em função da sua qualidade de impressão.

De forma a perceber qual a dimensão que melhor se adapta ao equipamento foram impressos diferentes conjuntos de parafusos e porcas, cujas medidas variavam entre o M3 e o M12. Os conjuntos impressos foram obtidos através da plataforma *Thingiverse*, estando alguns deles representados na Figura 50.



Figura 50 - Diferentes parafusos impressos no estudo inicial.

Após serem impressos todos os modelos, estes foram sujeitos a uma inspeção visual e de funcionalidade. A rosca dos parafusos impressos foi inspecionada visualmente, sendo submetida posteriormente a uma análise por macroscópica. As porcas foram analisadas através do enroscar das mesmas nos respetivos parafusos, de forma a analisar a sua funcionalidade.

A análise macroscópica foi feita com recurso a uma lupa estereoscópica modelo SZ-ET da marca *Olympus*®, apresentada na Figura 51.

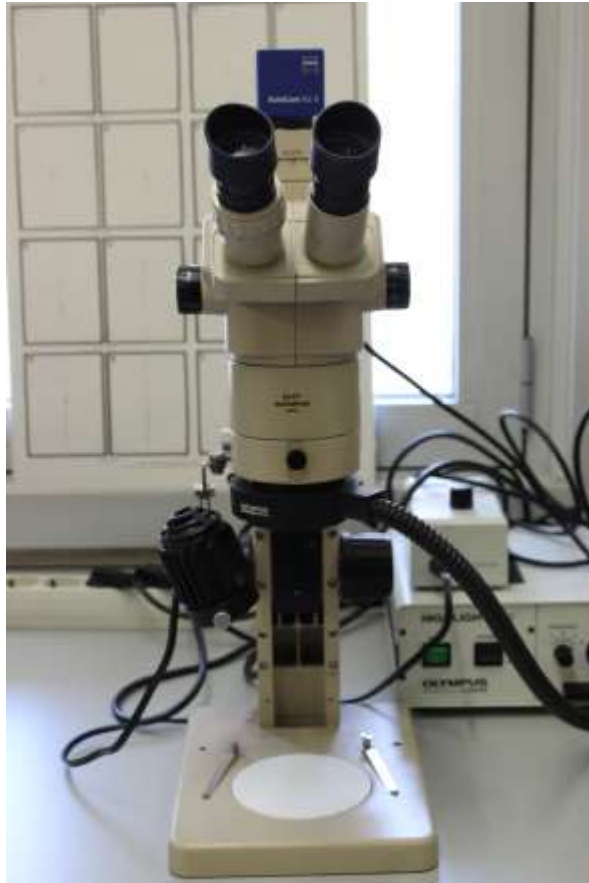


Figura 51 – Lupa estereoscópica utilizada nas observações macroscópicas.

3.4.2 Estudo da Orientação de Construção

Nesta fase do estudo foi analisada a influência da orientação de construção nos parafusos obtidos. Com esse objetivo, três orientações de construção diferentes estiveram em estudo: vertical, horizontal e com um ângulo de 45° com o eixo Z.

Como foi explicado no capítulo 2.3-Fabrico Aditivo por Extrusão, quando o ângulo de construção de camadas, ϕ , tende para valores mais agudos, a peça passa a necessitar de uma estrutura de suporte de forma a garantir apoio para a camada depositada (Leary *et al.* 2013).

Com a alteração da orientação de construção dos parafusos, houve a variação do ângulo de construção de camadas, tendendo este para ângulos agudos, gerando assim a necessidade de adição desta estrutura no caso das orientações horizontal e a 45° com o eixo Z. As estruturas de suporte adicionadas podem ser visualizadas na Figura 52, no caso da orientação horizontal, e Figura 53, no caso da orientação a 45° do eixo Z, sendo as estruturas de suporte representadas a verde.

Se o parafuso for impresso na orientação vertical, não há necessidade de adição de uma estrutura de suporte de auxílio, como pode ser verificado na Figura 54.

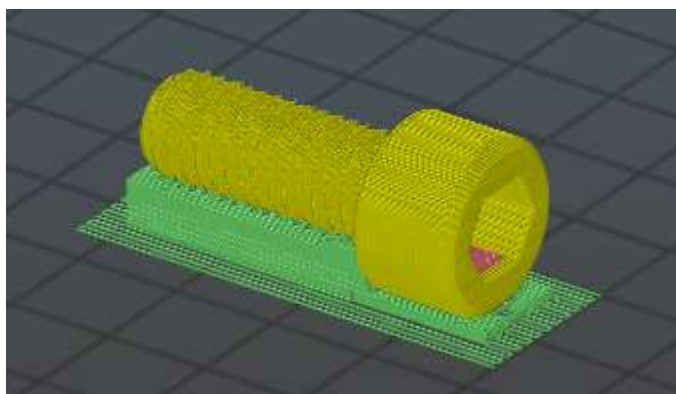


Figura 52 - Pré-visualização do parafuso impresso na horizontal com estrutura de suporte

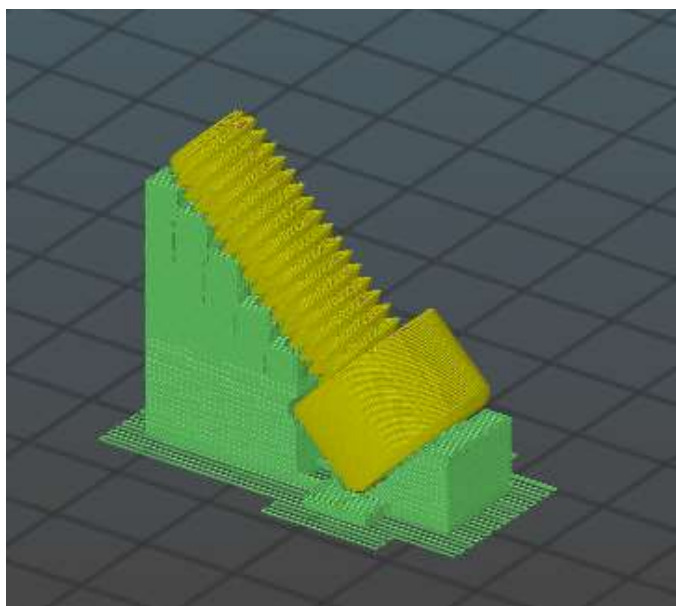


Figura 53 - Pré-visualização do parafuso impresso a 45° do eixo Z com estrutura de suporte.

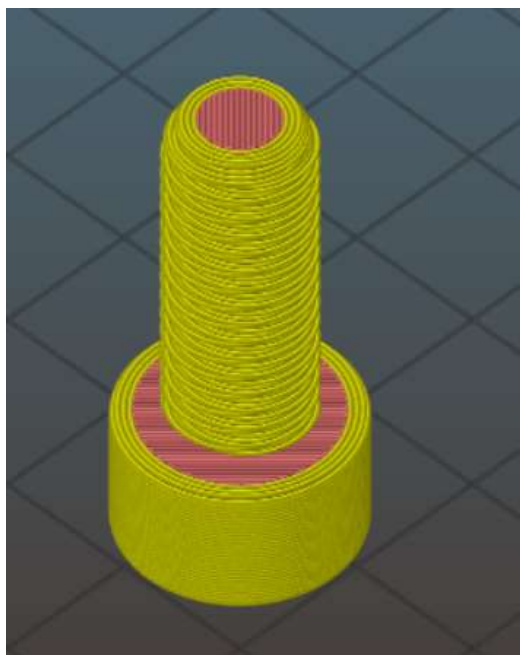


Figura 54 - Pré-visualização do parafuso impresso verticalmente.

A configuração dos parâmetros de impressão foi mantida constante para os três modelos impressos tendo sido definida uma espessura de camada de 0,1mm, velocidade de preenchimento dos perímetros de 60mm/s e número de perímetros igual a três. A seleção destes parâmetros teve por base os conhecimentos adquiridos na revisão bibliográfica, sendo uma configuração que permite a obtenção de peças com boa precisão dimensional e rugosidade superficial. A temperatura de extrusão do material foi definida para 200°C e a temperatura da plataforma de construção foi de 70°C, utilizando assim os valores recomendados pelo fornecedor.

As estruturas de suporte utilizadas foram geradas a partir do software *Slic3r Prusa Edition*®, tendo sido os parâmetros referentes a estas estruturas automaticamente configurados, havendo apenas a necessidade de indicar que o suporte gerado deve ser do tipo removível.

As peças obtidas foram inspecionadas visualmente, sendo posteriormente analisadas macroscopicamente, de forma a melhor compreender os efeitos da variação da orientação de construção e os danos causados pela remoção da estrutura de suporte. O equipamento utilizado na análise macroscópica desta fase trata-se do mesmo equipamento utilizado nos Estudos Iniciais.

3.4.3 Estudo da Influência de Parâmetros

Esta fase tem como objetivo definir os parâmetros considerados influentes na qualidade do processo de impressão dos parafusos e porcas.

Os parâmetros em análise, definidos com base na revisão bibliográfica, foram estudados segundo a metodologia de Taguchi, com o objetivo de minimizar o número de amostras necessárias. Os parâmetros selecionados— espessura de camada, velocidade de preenchimento dos perímetros, número de perímetros e temperatura de extrusão— foram analisados em dois níveis diferentes, encontrando-se os valores utilizados para cada nível descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros do processo avaliados e níveis atribuídos.

Parâmetro	Níveis	
Espessura de camada (mm)	0,1	0,3
Velocidade de preenchimento dos perímetros (mm/s)	20	60
Número de perímetros	1	3
Temperatura de Extrusão (°C)	185	215

Tendo em conta o número de parâmetros em estudo e o número de níveis de cada parâmetro, foi selecionada uma matriz ortogonal de Taguchi do tipo L8, originando um total de 8 combinações de parâmetros diferentes, apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Matriz ortogonal de Taguchi, do tipo L8, com as diferentes combinações de parâmetros.

Combinação	Espessura de camada (mm)	Velocidade de preenchimento dos perímetros (mm/s)	Número de perímetros	Temperatura de Extrusão (°C)
1	0,1	20	1	185
2	0,1	20	3	215
3	0,1	60	1	215
4	0,1	60	3	185
5	0,3	20	1	215
6	0,3	20	3	185
7	0,3	60	1	185
8	0,3	60	3	215

Para cada combinação obtida foram produzidas três amostras, o que perfaz um total de 24 amostras. Estas amostras foram produzidas individualmente, sendo que as amostras referentes a cada condição foram obtidas de forma sequencial.

Após serem obtidas todas as amostras foram efetuadas três análises: análise dimensional, medição de massa e ensaios mecânicos de uma junta aparafusada. A metodologia seguida para cada uma destas análises é descrita nos seguintes pontos.

Os restantes parâmetros foram mantidos constantes ao longo de todo o processo. Os valores definidos para os mesmos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Restantes parâmetros de impressão

Parâmetro	Valor
Orientação de Construção	Vertical ⁴
Espaçamento entre filamentos de preenchimento [mm]	0
Ângulo de preenchimento [°]	45
Largura do filamento depositado [mm]	0,4
Diâmetro do bico extrusor [mm]	0,4
Velocidade de Preenchimento [mm/s]	40
Multiplicador de Extrusão	0,9
Percentagem de Preenchimento [%]	100
Temperatura da plataforma de construção [°C]	70
Estratégia de deposição	Retilínea

(i) Análise Dimensional

A análise dimensional dos parafusos impressos foi feita com recurso a um paquímetro digital da marca *Mitutoyo*, modelo CD-6''ASX, com uma resolução de 0,01mm. Foram efetuadas 5 medições do diâmetro maior do parafuso, sendo as mesmas realizadas ao longo de todo o comprimento do mesmo, apresentadas na Figura 55.

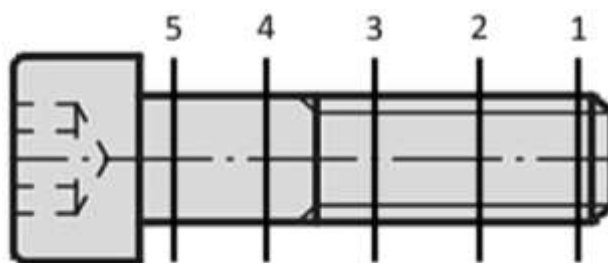


Figura 55 - Medições efetuadas ao longo do parafuso.

⁴ A orientação de construção foi escolhida com base nos resultados do estudo deste parâmetro, anteriormente descrito.

O valor do diâmetro do parafuso é obtido através da média aritmética das cinco medições realizadas, tendo sido este o valor utilizado para prosseguir com a análise.

No que toca às porcas em análise o procedimento foi em todo similar com o dos parafusos. Foram efetuadas 3 medições do diâmetro nominal da rosca do mesmo, variando entre si na direção que era efetuada a medição. O valor utilizado para a análise, tal como nos parafusos, resultou da média aritmética das três medições efetuadas.

Os valores obtidos foram a posteriori submetidos a uma análise estatística, com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros nos mesmos.

(ii) Medição de Massa

A medição da massa dos componentes impressos foi feita através de uma balança eletrónica modelo HLD 300 da *Scale House*®, apresentada na Figura 56. Este equipamento apresenta uma resolução de $\pm 0,05\text{g}$.



Figura 56 - Balança eletrónica utilizada na medição de massa dos componentes.

(iii) Ensaios Mecânicos

De forma a estudar a resistência mecânica dos elementos obtidos, foi desenvolvido um ensaio mecânico que estudou a força suportada pelos parafusos ao corte. Este baseava-se numa junta simples aparafusada por um parafuso e porca, com as dimensões representadas na Figura 57.

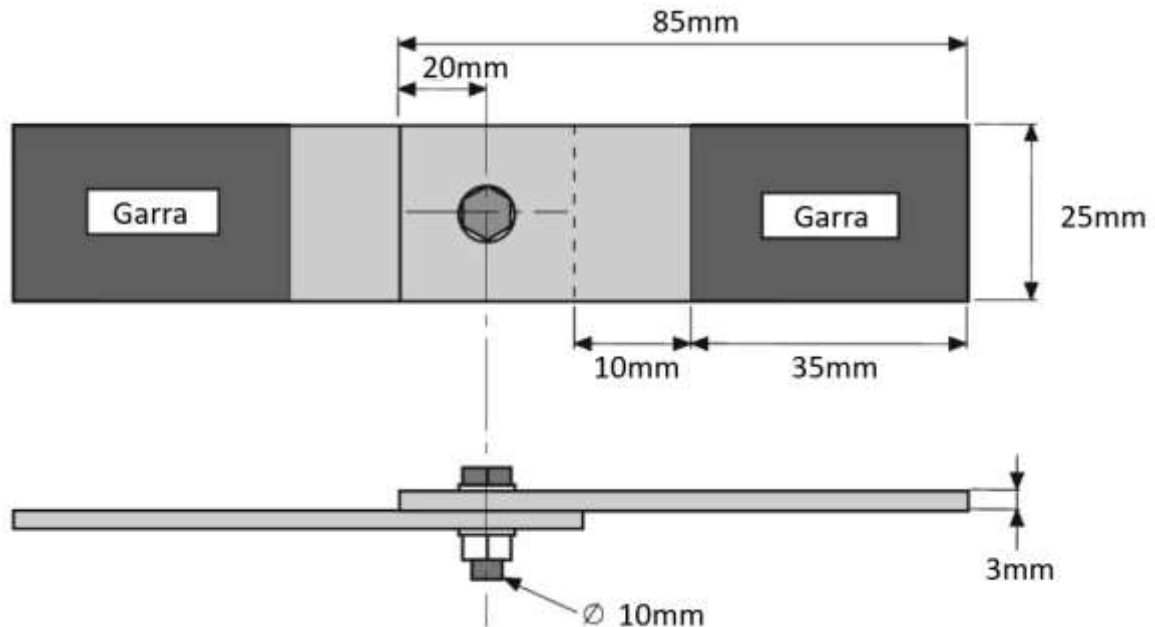


Figura 57 - Junta simples aparafusada (Adaptado de McCarthy *et al.* (2002)).

De forma a manter a maior repetibilidade possível nos ensaios foi utilizada uma anilha quadrada de silicone com 2mm de espessura, apresentado na Figura 58, para fixar o parafuso a ensaiar no provete, uma vez que nem todas as porcas tinham definição de rosca que possibilitava a fixação do parafuso. Tal anilha desempenhava apenas funções de fixação, não sendo responsável pelo aperto dos componentes a ligar. O provete e parafuso devidamente preparados para a realização do ensaio encontram-se representados na Figura 59.

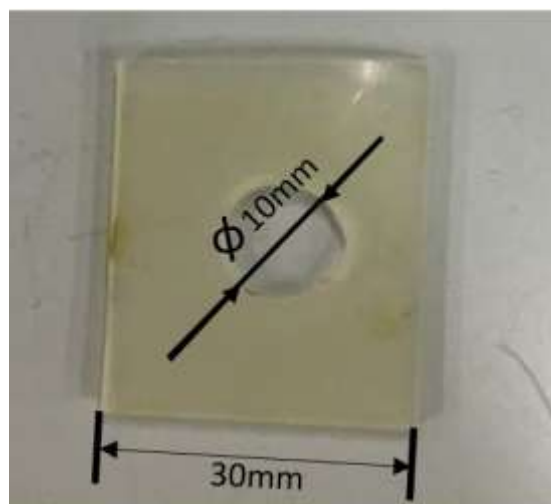


Figura 58 - Anilha de silicone utilizado na fixação do parafuso.



Figura 59 – Dispositivo de ensaio colocado na máquina de ensaios.

A máquina de ensaios utilizada, representada na Figura 60, trata-se de um equipamento da *MTS®*, modelo 812, do Laboratório de Ensaios Tecnológicos (LET) do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP. Juntamente com este equipamento foi utilizada uma célula de carga com capacidade de medição até 10kN em conjunto com o controlador *FlexTest 40*, ambos fornecidos pelo mesmo fabricante da máquina. O ensaios forma realizados a uma velocidade de 1mm/min.



Figura 60 - Máquina de ensaios utilizada.

No mesmo equipamento foram também realizados ensaios à tração de provetes impressos nas mesmas condições que os parafusos. Neste estudo foi apenas impresso um provete por condição, devido ao elevado tempo de impressão associado à orientação de construção definida.

As dimensões do provete seguem os valores da norma ISO 527-1:2012, sendo apresentada na Figura 61 um exemplo de provete impresso na orientação vertical, com os suportes gerados.

Foram obtidas as curvas tensão/deformação dos provetes ensaiados o que permite obter a tensão de rutura e o módulo de Young. Este último valor foi obtido através de uma regressão linear do domínio elástico do material. Tal como é referido na lei de Hooke, o módulo de Young é o declive da reta que o gráfico tensão/deformação traça, quando o material se encontra no domínio elástico, tendo sido este último o valor retirado da regressão linear (Shigley, Mischke e Budynas 2008). A regressão linear foi obtida limitando zonas das curvas de tração cujos resultados obtidos mais se aproximavam ao comprimento de uma reta, sendo que os limites utilizados variam entre os diferentes ensaios realizados

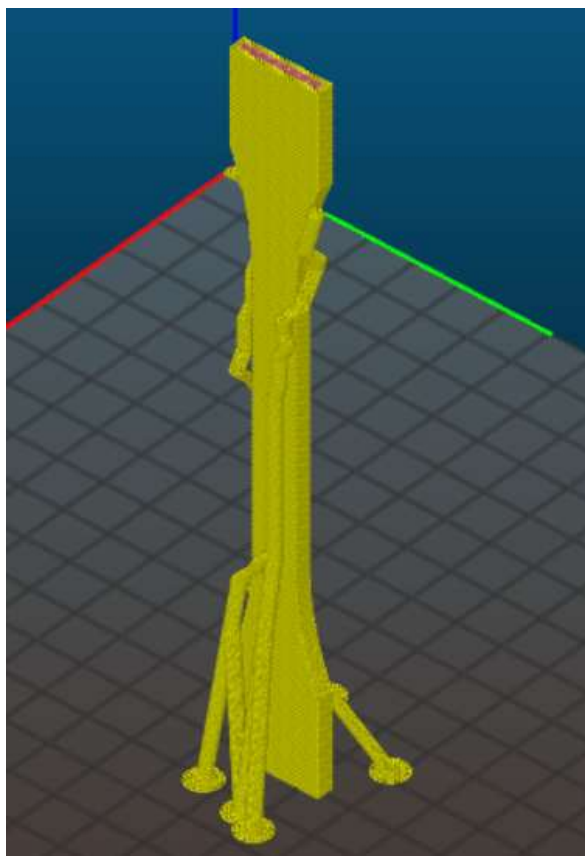


Figura 61 - Provete de tração ISO 527 impresso na orientação vertical.

4 Resultados

4.1 Estudos Iniciais

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos nesta fase inicial, em que se pode observar com detalhe a rosca de diferentes parafusos.

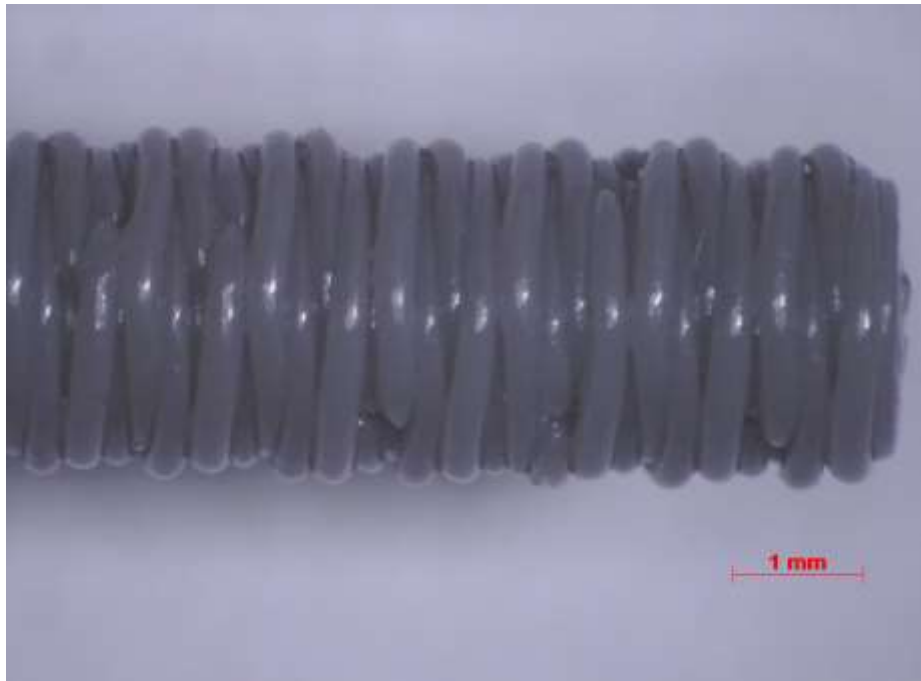


Figura 62 - Rroca do parafuso M3.

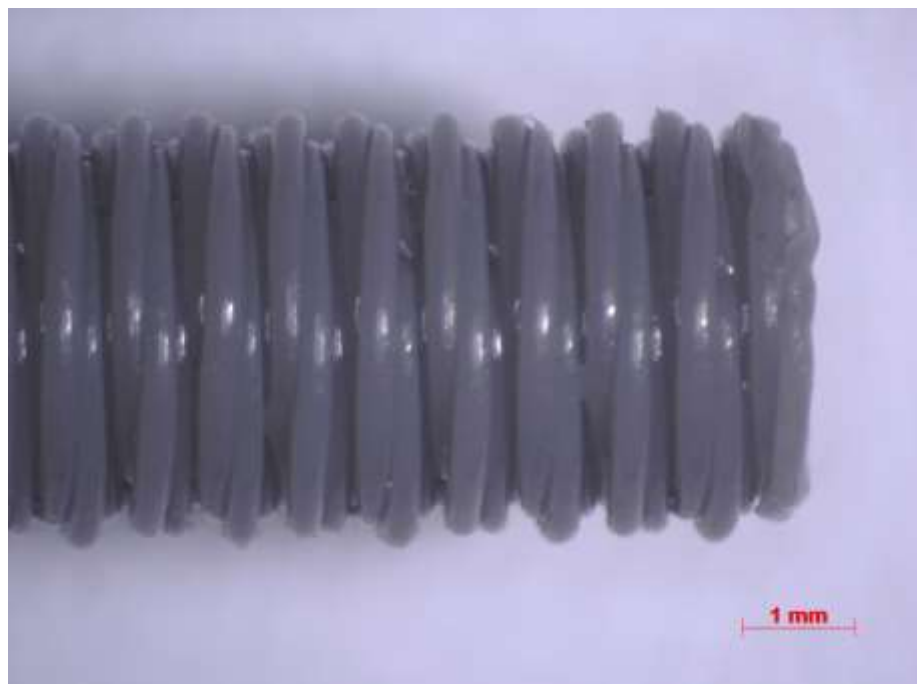


Figura 63 - Rosca do parafuso M4.

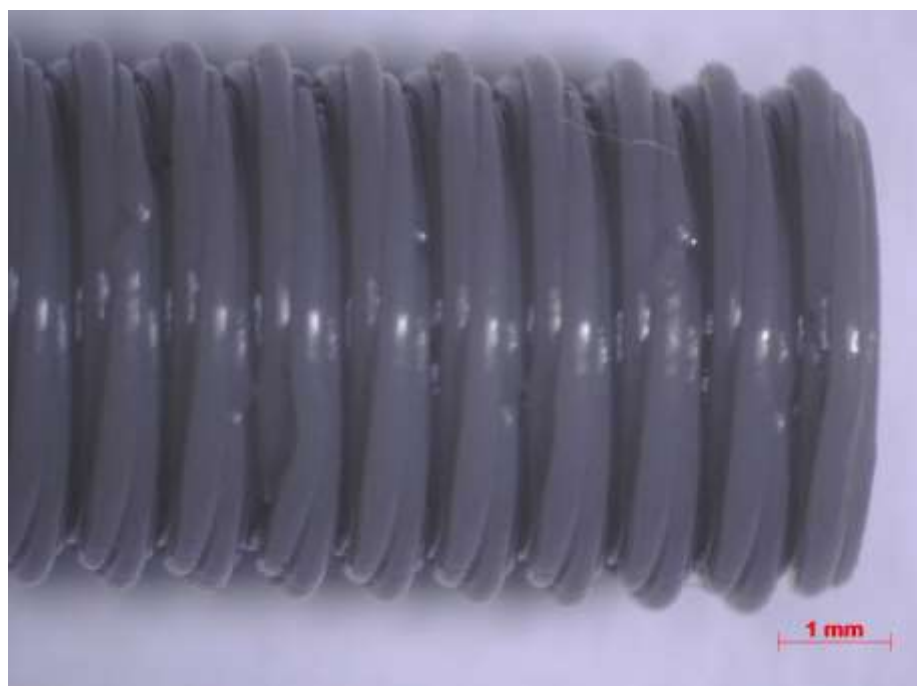


Figura 64 - Rosca do parafuso M5.

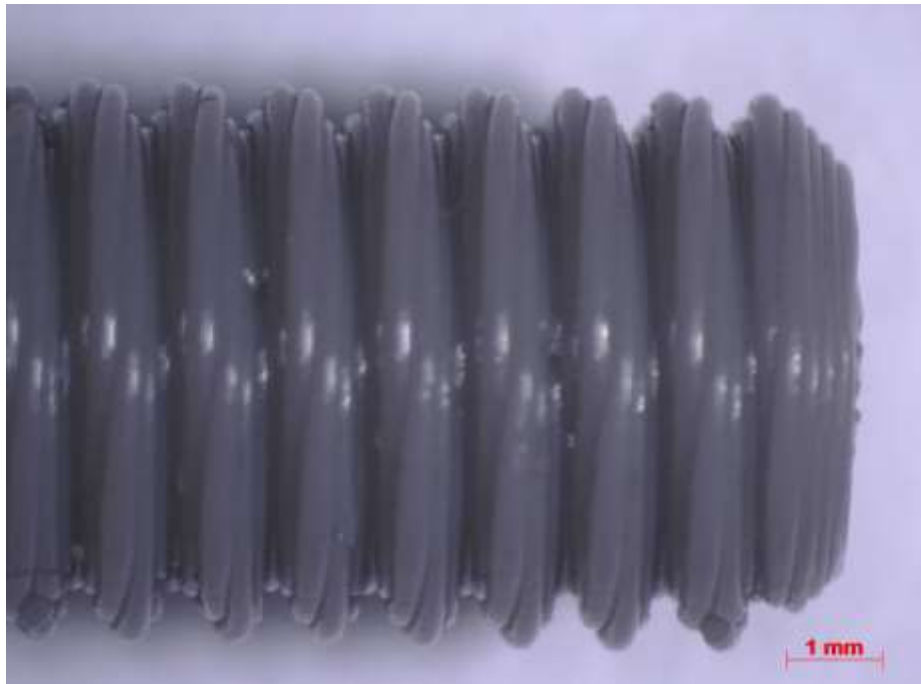


Figura 65 - Rosca do parafuso M6.



Figura 66 - Rosca do parafuso M10.

Nas figuras anteriormente apresentadas, sequenciadas através da dimensão do modelo, é possível verificar um incremento da qualidade da rosca impressa, cuja relação aparenta ser diretamente proporcional à dimensão do modelo impresso. Tal incremento é observável através do perfil de rosca impresso, que apresenta um perfil mais denotado e uniforme quando são impressos parafusos de dimensão superior

Na Figura 62 é observável o perfil de rosca do parafuso M3, sendo visível a falta de definição da mesma, que resulta num parafuso inutilizável, uma vez que não é verificável uma distinção clara entre diâmetros do perfil da rosca impressa. Nas Figura 63 e Figura 64 são apresentadas as rocas dos parafusos M4 e M5 respetivamente. Nestes modelos há uma melhor distinção entre diâmetro maior e diâmetro menor. No entanto, as roscas impressas não são satisfatórias ao nível da uniformidade. Ainda são bastante visíveis os perímetros dos filamentos depositados o que torna o perfil de rosca menos definido, dificultando assim o processo de enroscar.

Na Figura 65 é visível o perfil da rosca do parafuso M6 que apresenta uma maior uniformidade ao longo de todo o comprimento. No entanto, ainda apresenta uma definição bastante reduzida ao nível do perfil, sendo possível fazer a distinção entre diferentes filamentos.

Por fim é apresentado o perfil da rosca do parafuso M10, na Figura 66. Este apresenta um perfil bastante mais definido e uniforme do que os anteriores, tendo sido, por estas razões, o escolhido para desenvolver o estudo.

A análise anterior permite identificar dois tipos de erros. Por um lado, certas dimensões apresentam uma variação pouco acentuada entre diâmetro exterior e interior da rosca, provocando uma falta de uniformidade do perfil ao longo do comprimento. Por outro lado, certos modelos apresentam uma baixa definição no perfil da rosca impressa. Ambos erros podem ser atribuídos à resolução do equipamento utilizado. A resolução de um equipamento FDM é definida por dois fatores: diâmetro do bico extrusor e espessura de camada. Estes são os dois fatores limitadores ao nível do detalhe que é possível obter nas peças impressas (Redwood, Schffer e Garret 2017).

No caso de um equipamento com um bico extrusor de 0,4mm de diâmetro, como é o caso do equipamento utilizado, a espessura máxima do filamento depositado é de 0,4mm. No entanto, a largura mínima à qual podem ser impressas paredes verticais com esta configuração é de 0,8mm, ou seja, duas vezes o diâmetro do bico extrusor, a fim de evitar a criação de paredes frágeis propensas a quebrar (González 2016; Relvas 2018). Em termos de nervuras, como é o caso das roscas, espessura mínima recomendada é de 0,6mm (Redwood, Schffer e Garret 2017).

No caso da análise aos modelos das porcas, foi verificado que os modelos impressos de dimensão inferior a M10 apresentavam alguma dificuldade em roscar nos respetivos parafusos, sendo verificável que o furo roscado das porcas apresentava uma dimensão inferior à expectável.

Estas alterações dimensionais entre o modelo CAD e a peça obtida são explicadas pelo fenómeno de compressão do filamento extrudido, sendo tal compressão causada pelo próprio bico extrusor ou por material depositado em camadas superiores da peça. As forças de compressão alteram o perfil do filamento depositado, o que resulta em variações do diâmetro dos furos das peças, sendo este fenómeno esquematizado na Figura 67 (Redwood, Schffer e Garret 2017).

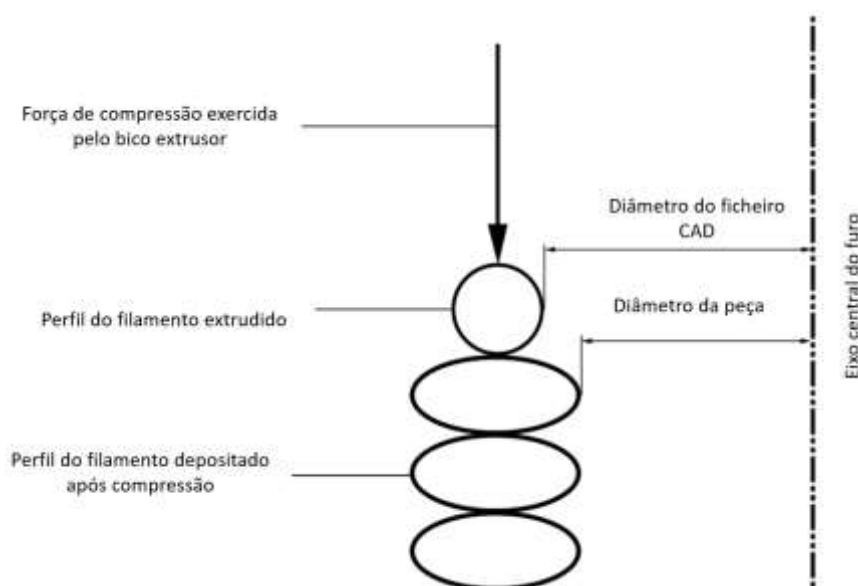


Figura 67 – Efeito da compressão no filamento depositado ao nível dos furos (adaptado de Redwood, Schffer e Garret (2017))

O fenómeno anteriormente descrito é inerente ao processo em si, sendo verificável em todos os furos impressos com valores relativamente aproximados. No entanto, é mais notória a sua influência quando os diâmetros dos furos nas peças impressas são de menores dimensões visto que o desvio do valor alvo, em termos percentuais, é superior (Sudin, Shamsudin e Abdullah 2016).

Em suma, do estudo realizado permitiu concluir que o modelo de parafuso de dimensão M10 seria o mais adequado para prosseguir com o trabalho visto que se tratava do modelo de dimensão mais reduzida, o que é um fator decisivo no que toca ao tempo de processamento do mesmo, que cumpria todas as exigências do projeto.

Com recurso novamente à plataforma *Thingiverse*, foi escolhido um parafuso de cabeça cilíndrica com oco hexagonal, cujas dimensões do modelo CAD seguem a norma ISO 4762. O comprimento selecionado foi de 25mm, de forma a minimizar o tempo de impressão do mesmo. A porca escolhida foi uma porca hexagonal que segue a norma ISO 4032.

As dimensões quer da porca quer do parafuso foram verificadas com recurso ao *software Meshmixer®*, sendo as dimensões apresentadas na Figura 68 e Figura 69, tendo sido obtido o valor de 9,85mm para o diâmetro do parafuso e 8,68mm para o diâmetro da porca.

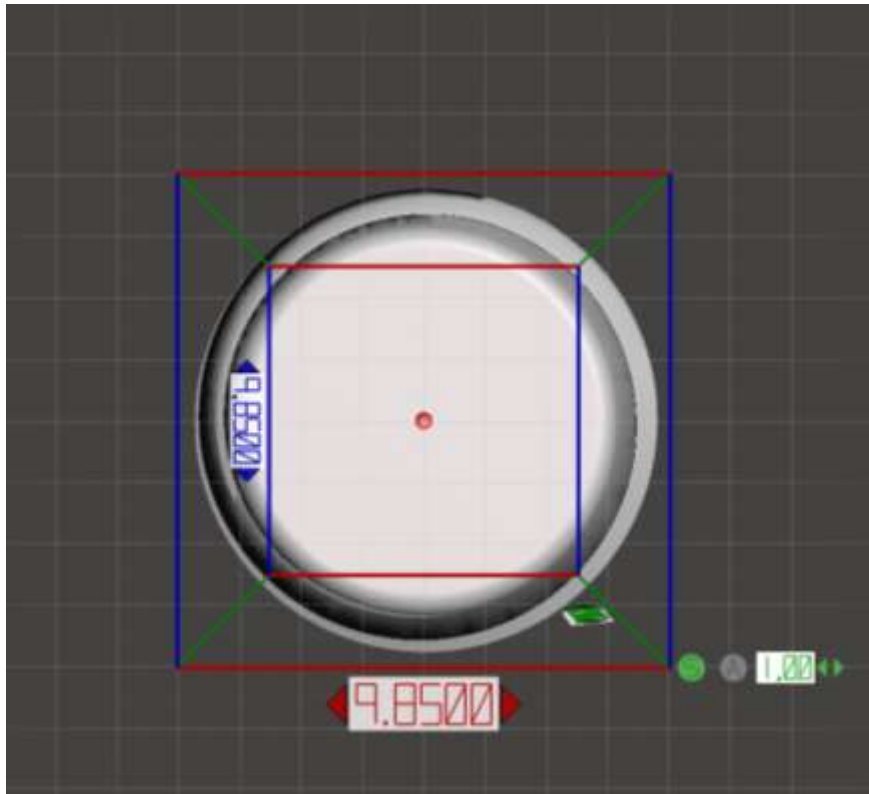


Figura 68 - Análise da dimensão do diâmetro da rosca no *Meshmixer*®.

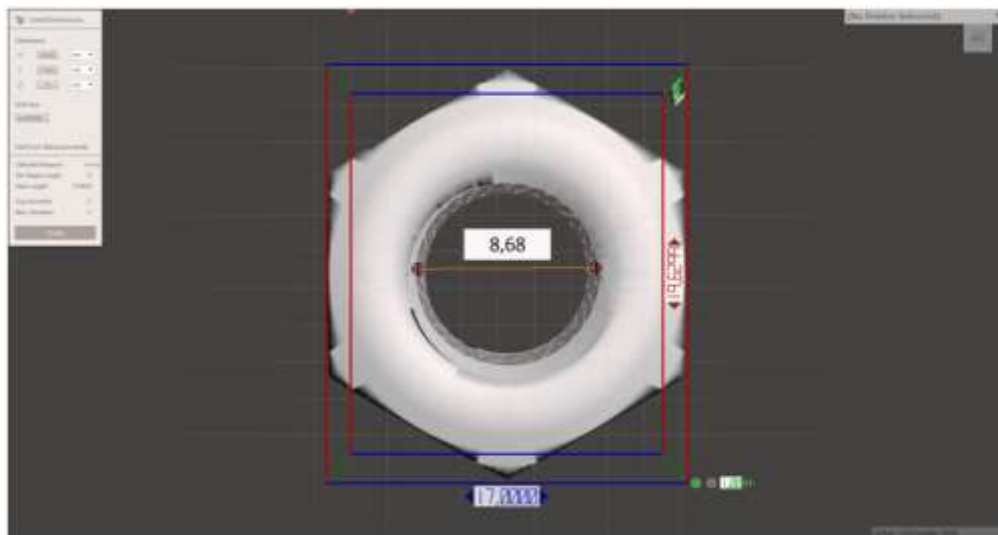


Figura 69 - Análise da dimensão da porca no *Meshmixer*®.

4.2 Orientação de construção

Como foi referido na secção 3.4.2, foram impressos três parafusos com diferentes orientações de construção: horizontal, vertical e a 45° com o eixo Z. Nesta secção são abordados os resultados obtidos neste estudo.

Na Figura 70 é possível observar os parafusos impressos nas diferentes orientações de construção. Por inspeção visual dos mesmos verificou-se que o processo de remoção de suportes nos parafusos impressos nas condições horizontal e com uma inclinação de 45° em relação ao eixo do Z foi bastante destrutivo para o modelo impresso, tornando a secção da rosca inutilizável nestas condições.

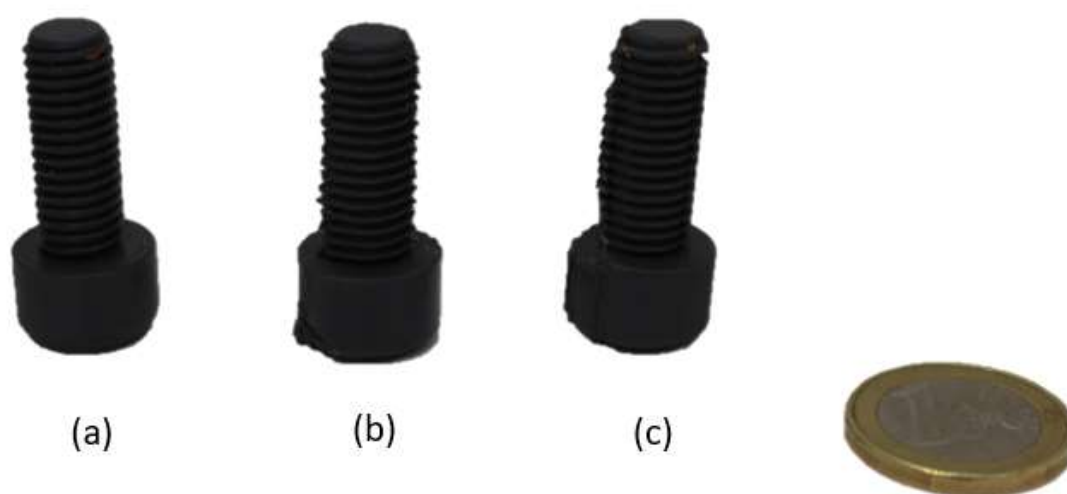


Figura 70 - Parafusos impressos na orientação vertical (a), inclinado 45° em relação a Z (b) e horizontal (c).

De forma a melhor avaliar a extensão dos danos sofridos pelos parafusos foi realizada uma análise macroscópica às amostras obtidas. Os resultados das observações são seguidamente apresentados.

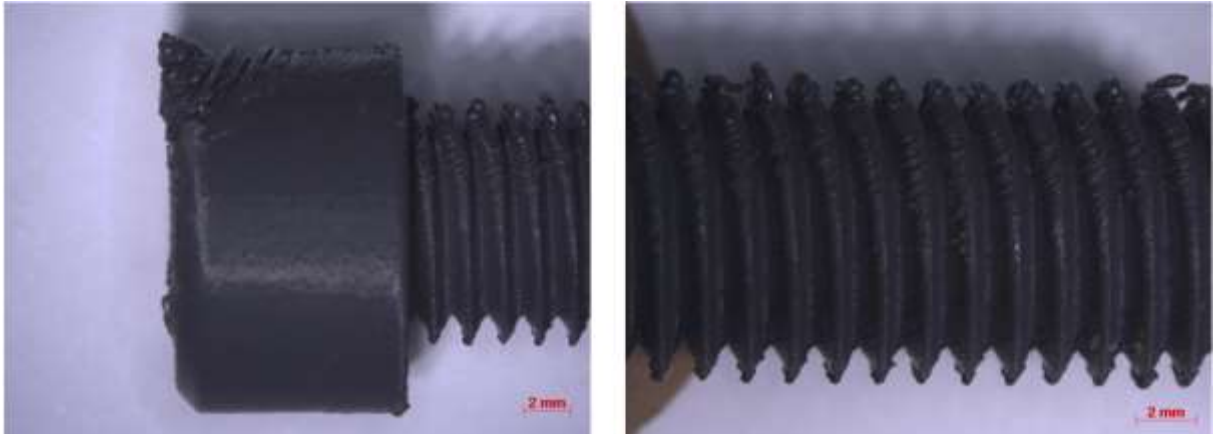


Figura 71 - Vista lateral da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação de 45° em relação ao eixo Z.

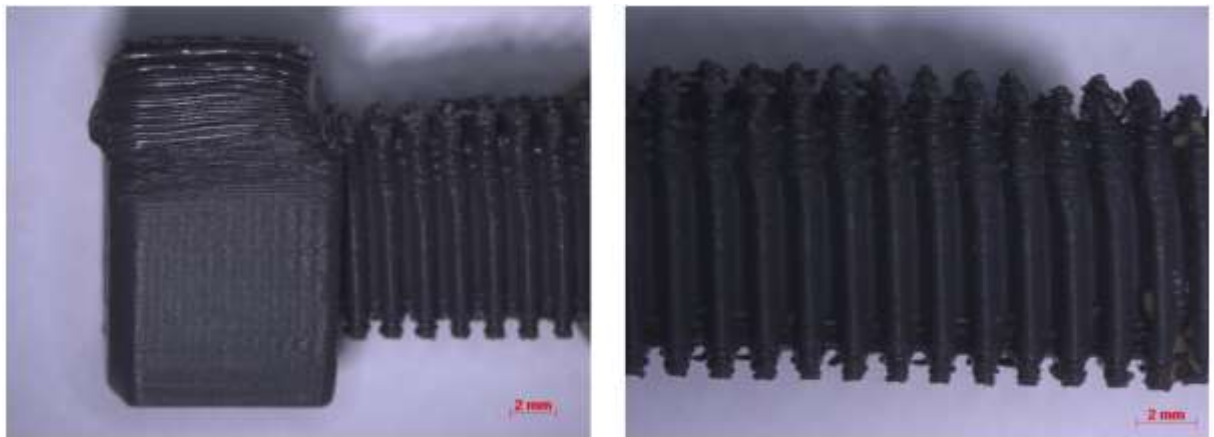


Figura 72 - Vista lateral da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação horizontal.

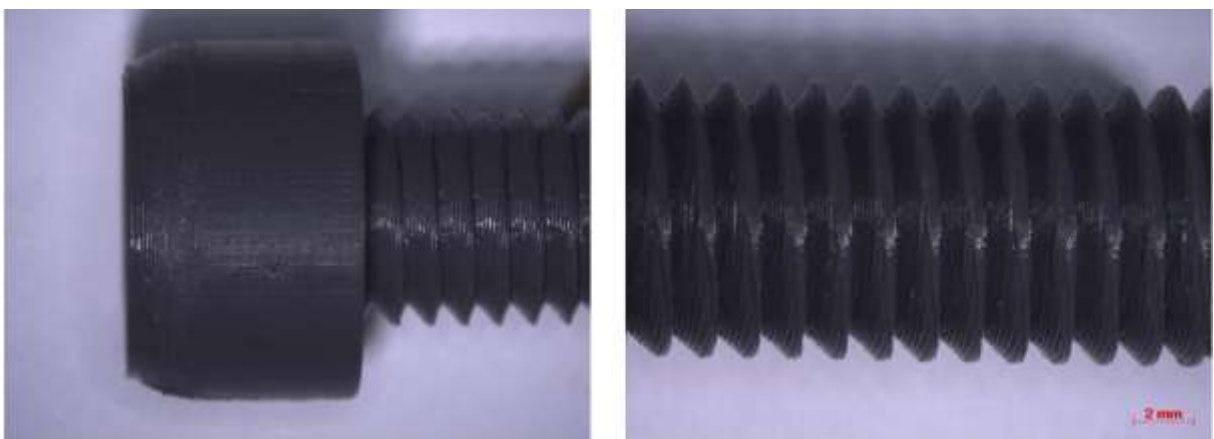


Figura 73 - Vista lateral da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação vertical.

Na Figura 71 é possível observar ao pormenor a rosca e a cabeça do parafuso impressos na orientação de 45° em relação a Z. No topo esquerdo da cabeça é possível observar uma enorme deformação, tendo sido esta resultante da falta de apoio dos filamentos depositados nessa zona, visto que não existem sinais de danos por remoção de suporte. No caso da rosca são visíveis diversos filamentos soltos e sinais de corte na extremidade desses filamentos, resultado da remoção do suporte dessa zona. É de notar ainda uma deformação ao nível do perfil da rosca que sofreu um ligeiro desvio por ação da gravidade.

No caso da Figura 72 apresenta-se a condição impressa na orientação horizontal. É visível uma deformação na zona da cabeça em todo semelhante à condição anterior que pode ser explicada pela orientação utilizada e pelo efeito da gravidade aquando da deposição de filamento. Ao nível da rosca é que as diferenças para o caso anterior são mais significativas. É notório o excesso de material presente na zona onde foi colocado o suporte da peça, havendo uma deterioração bastante superior à vista anteriormente. Tal pode ser explicado no formato de suporte utilizado neste caso, que englobava uma percentagem maior do diâmetro do parafuso e danificava uma área superior do mesmo. No que toca ao desalinhamento do perfil da rosca este foi bastante inferior ao anterior havendo, no entanto, há um ligeiro desvio.

Por fim, na Figura 73 encontra-se a condição impressa na vertical. Nesta condição as deformações verificadas nas condições anteriores encontram-se bastante minimizadas, quer ao nível da cabeça quer ao nível da rosca, sendo a única condição em que a rosca se apresenta completamente funcional.

Na revisão bibliográfica anteriormente apresentada a orientação de construção foi identificada como fator influente em certas características que seriam de interesse avaliar, para o caso dos parafusos e porcas. Nos trabalhos de Kumar, Kannan e Sankaranarayanan (2014) e Vijay, Danaiah e Rajesh (2011) foi visto como um fator influente ao nível da rugosidade da superfície das peças impressas, afetando no caso dos parafusos e porcas, a qualidade da rosca obtida. Alafaghani *et al.* (2017) também tinham identificado este parâmetro como elemento preponderante na precisão dimensional das peças.

No entanto, a variação deste parâmetro seria mais significativa ao nível das propriedades mecânicas, sendo que, teoricamente, uma orientação horizontal traria grandes benefícios para os componentes obtidos. Tal fenómeno deve-se à orientação dos filamentos depositados que, tendo em conta que os parafusos são desenhados para absorver esforços de tração, a orientação horizontal seria a mais indicada. Tal hipótese é corroborada pelos estudos de Chacón *et al.* (2017), Liu *et al.* (2017), Raut *et al.* (2014) e Mishra e Mahapatra (2014).

De facto, a natureza anisotrópica das peças impressas por FDM é uma das principais limitações da tecnologia. Define-se material anisotrópico como um material cujas propriedades mecânicas variam em função da direção da solicitação. As peças produzidas por FDM tem um comportamento em tudo similar com estes materiais sendo por vezes verificável que a resistência mecânica é mais influenciada pela qualidade da adesão entre camadas do que pela escolha do material em que a peça é produzida.

Como se trata de um processo onde as camadas são sobrepostas sequencialmente, gerando entre elas fenómenos de adesão mecânica, não existe um segmento contínuo de material. Tal fenómeno resulta em concentrações de tensões elevadas nas interfaces de junção de camadas o que leva a uma grande redução da resistência mecânica da peça.

No caso de peças funcionais, deve ter sido em consideração a principal direção de solicitação da mesma, uma vez que a deposição dos filamentos paralelamente a essa direção é

a configuração que traz mais vantagens ao nível da resistência mecânica (Redwood, Schffer e Garret 2017). A Figura 74 esquematiza o comportamento anteriormente descrito.

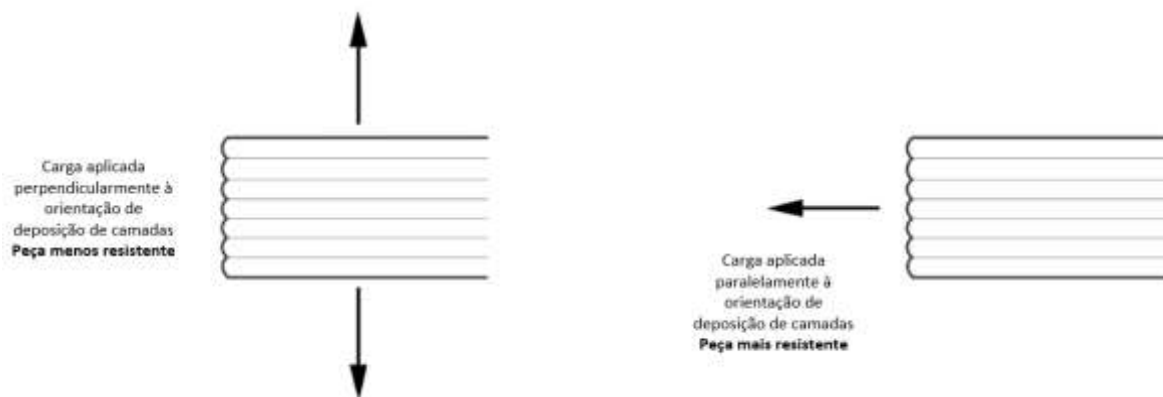


Figura 74 - Direção de solicitação e orientação das camadas (adaptado de Redwood, Schffer e Garret (2017)).

Tal como foi referido no estudo de Kumar, Kannan e Sankaranarayanan (2014) o processo de remoção de estruturas de suporte pode causar defeitos ao nível da rugosidade superficial das peças. Este processo é dificultado quando a estrutura de suporte é impressa no mesmo material que a peça, havendo a necessidade de utilização de ferramentas de corte para a separação da estrutura, o que resulta sempre em deformações superficiais na peça.

No estudo desenvolvido por Leite *et al.* (2018) é referido que quando o suporte é fabricado no mesmo material que a peça, a rugosidade da superfície que se encontra em contacto com o suporte passa a estar mais dependente do processo de remoção do suporte do que os parâmetros utilizados na impressão. Os autores referem ainda que a melhor estratégia de suporte em termos de qualidade superficial da peça obtida passa pela utilização de suportes solúveis, cujo processo de remoção é menos destrutivo para a peça.

De facto, a utilização de uma estrutura de suporte solúvel traria grandes vantagens ao nível da qualidade dos parafusos impressos, podendo até possibilitar variação da orientação de construção. O material utilizado no estudo também é passível de ser impresso com uma estrutura de suporte solúvel, nomeadamente uma estrutura de PVA (*Poly(vinyl acetate)*) que seria dissolvida em água quente. No entanto, o equipamento utilizado no estudo deveria conter no mínimo dois sistemas de extrusão de forma a possibilitar a impressão multimaterial (Redwood, Schffer e Garret 2017). Tal não se verifica no equipamento utilizado uma vez que foi adquirido tendo em conta a vertente do baixo custo.

Por ser a única condição que permite, com o equipamento e materiais utilizados, fabricar parafusos funcionais, o estudo prosseguiu com a construção de todos os parafusos na orientação vertical.

4.3 Estudo da Influência de Parâmetros

(i) Análise Dimensional

Através da metodologia anteriormente apresentada, foi determinado um conjunto de dados referentes às características dimensionais das peças em estudo.

No caso dos parafusos, analisaram-se os valores dos diâmetros externos da rosca do mesmo, que no modelo CAD apresentava uma dimensão de 9,85mm. Para cada amostra analisada foi determinado um valor médio das medições, sendo estes valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores médios da análise dimensional dos parafusos.

Condição	Diâmetro Externo (mm)			
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	$\bar{x} \pm \sigma_p$
C1	9,39	9,45	9,47	9,43±0,03
C2	9,44	9,44	9,43	9,44±0,00
C3	9,55	9,48	9,50	9,51±0,03
C4	9,31	9,34	9,42	9,36±0,05
C5	9,29	9,35	9,33	9,32±0,03
C6	9,19	9,41	9,33	9,31±0,09
C7	9,40	9,40	9,17	9,33±0,11
C8	9,47	9,57	9,46	9,50±0,05

Após serem obtidos os valores das medições procedeu-se à análise dos mesmos. Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de forma a verificar a dispersão total do conjunto de dados, identificando a sua origem e avaliando a contribuição de cada variável para a dispersão total (Carbas 2008).

Na análise realizada, cujos resultados se encontram disponibilizados na Tabela 11, foi estudada a influência dos seguintes parâmetros: espessura de camada (EpC), velocidade de deposição dos perímetros (VeP), número de perímetros (NdP) e temperatura de extrusão (TeE).

Tabela 11 - Resultados da ANOVA dos valores da análise dimensional dos parafusos.

Parâmetro	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Variância	Valor de F	Valor P
EpC (mm)	1	0,03	0,03	4,23	0,05
VeP (mm/s)	1	0,01	0,01	2,03	0,17
NdP	1	0,00	0,00	0,00	0,97
TeE (°C)	1	0,04	0,04	6,13	0,02
Erro	19	0,13	0,071	-	-
Total	23	0,22	-	-	-

Um dos resultados obtidos através desta análise é a significância dos parâmetros, representado nos resultados pelo valor P. Este valor mede a evidência de determinado parâmetro

contra a hipótese nula. A hipótese nula dita que não existe nenhuma associação entre determinado parâmetro e a resposta final. Utilizando um nível de significância de 95%, quando o valor de P é inferior a 0,05 a associação é considerada estatisticamente significativa, podendo assim considerar o parâmetro influente na resposta em análise (Minitab 2019).

No caso da análise anteriormente apresentada, o único parâmetro que demonstrou ser influente, ao nível da dimensão dos parafusos, foi a temperatura de extrusão. De forma a melhor analisar os resultados da ANOVA, na Figura 75 é apresentado o gráfico das médias ajustadas de cada fator em cada nível analisado.

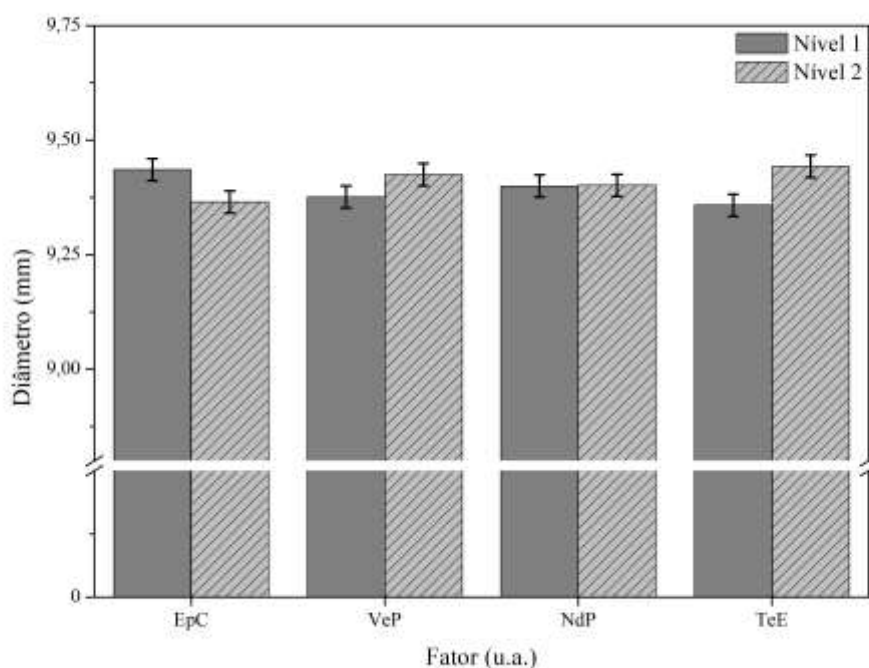


Figura 75 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros no diâmetro dos parafusos.

Os resultados obtidos nesta análise corroboram os resultados dos trabalhos de Beniak *et al.* (2019) e Alafaghani *et al.* (2017). De facto, no processo de FDM a temperatura de extrusão é um dos parâmetros que mais influencia o comportamento do material quando este é depositado, podendo ainda afetar o material previamente depositado. Estas alterações encontram-se relacionadas com fenómenos de contração por parte do polímero extrudido (Kaveh *et al.* 2015). Estas variações também são atribuídas a fenómenos de expansão do mesmo aquando da extrusão, sendo este fenómeno observável quando são utilizadas temperaturas de extrusão mais elevadas, interferindo assim na dimensão do material depositado (Alhubail 2012).

Outra explicação, apresentada por Beniak *et al.* (2019) tem por base a viscosidade do material que, a temperaturas mais elevadas, o torna mais líquido e facilita a sua extrusão. Este fenómeno pode levar a problemas de sobre extrusão, bem como à incorreta deposição do material, podendo o mesmo escoar para camadas inferiores.

No entanto, seria expectável, por análise dos trabalho de Papazetis e Vosniakos (2019), que a espessura de camada fosse uma fator influente nesta característica. De facto, o valor de P deste parâmetro é bastante aproximado ao valor de prova limite para o mesmo ser considerado

influyente (0,05), sendo ligeiramente superior (0,054). Uma explicação para este valor pode estar relacionada com a existência de ruídos externos ao sistema. Por tal entende-se que o parâmetro em questão, apesar de não estar diretamente correlacionado com o valor da análise dimensional pode influenciar a dimensão da rosca obtida, por influência noutro parâmetro não englobado pelo estudo. Como a espessura de camada é um fator que na literatura é amplamente correlacionado com a rugosidade superficial (Kumar, Kannan e Sankaranarayanan 2014; Pérez et al. 2018; Vijay, Danaiah e Rajesh 2011; Wang et al. 2019), o valor obtido nesta análise pode dever-se à influência do parâmetro nesta característica, provocando, por alteração da mesma, variações nas medições do diâmetro.

No caso das porcas, os valores médios dos diâmetros medidos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores médios da análise dimensional das porcas.

Condição	Diâmetro Externo (mm)			
	<i>Amostra 1</i>	<i>Amostra 2</i>	<i>Amostra 3</i>	$\bar{x} \pm \sigma_p$
C1	8,55	8,71	8,43	8,56±0,12
C2	8,60	8,65	8,61	8,62±0,02
C3	8,27	8,30	8,32	8,30±0,02
C4	8,58	8,54	8,60	8,57±0,03
C5	7,09	7,13	7,08	7,10±0,02
C6	8,65	8,51	8,61	8,59±0,06
C7	7,45	7,47	7,54	7,49±0,04
C8	8,52	8,62	8,55	8,56±0,04

Posteriormente foi realizada uma análise ANOVA aos valores apresentados, tendo sido devolvidos os resultados apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados da ANOVA dos valores da análise dimensional das porcas.

Parâmetro	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Variância	Valor de F	Valor de P
EpC (mm)	1	2,01	2,01	18,01	0,00
VeP (mm/s)	1	0,00	0,00	0,01	0,94
NdP	1	3,16	3,16	28,29	0,00
TeE (°C)	1	0,15	0,15	1,34	0,26
Erro	19	2,12	0,11	-	-
Total	23	7,43	-	-	-

Tal como no caso anterior, o gráfico das médias ajustadas dos fatores analisados é representado na Figura 76.

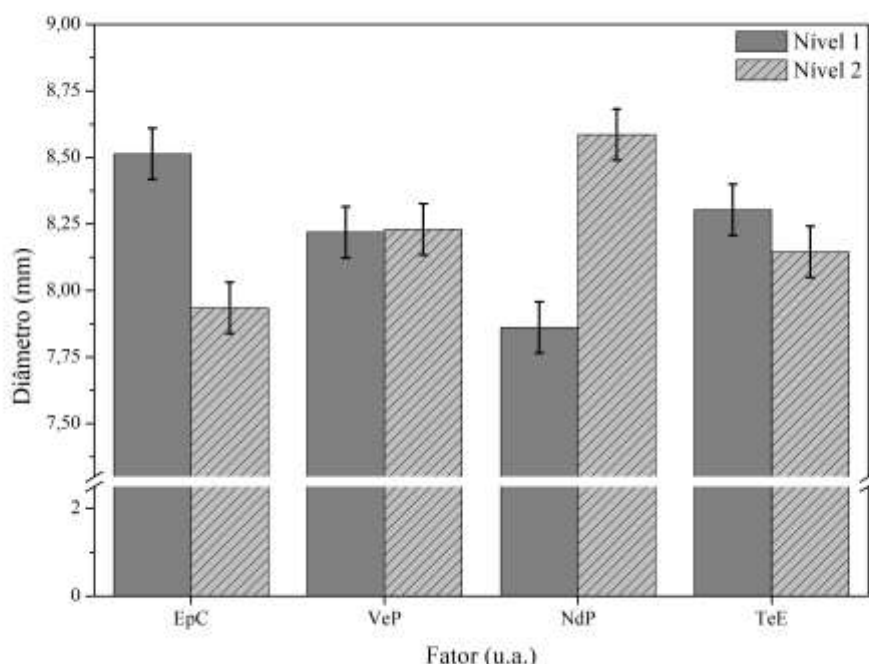


Figura 76 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros no diâmetro das porcas.

Para o diâmetro das porcas foram considerados influentes dois parâmetros, a espessura de camada e o número de perímetros, obtendo ambos elevados valores de significância. De notar que, como seria expectável, os parâmetros considerados influentes variam em relação ao parafuso, uma vez que no caso do parafuso se analisa um elemento que pode ser visto como um “macho” enquanto que no estudo da porca o elemento passa a ser “fêmea”.

No caso do número de perímetros, a influência deste está de acordo com os resultados do estudo de Durão *et al.* (2019) que refere que este parâmetro é responsável pela densidade das paredes externas da peça tendo, como tal, influência nas dimensões finais da peça obtida. O estudo de Mohamed, Masood e Bhowmik (2016) também obteve resultados semelhantes no que toca ao número de perímetros utilizados, tendo sido verificado que este parâmetro exercia influência ao nível do comprimento e largura das peças obtidas, tal como foi verificado nos resultados apresentados.

Relativamente à influência da espessura de camada, como foi descrito no estudo dos parafusos, este parâmetro é bastante influente no que toca à rugosidade superficial, tendo-se verificado uma variação desta característica, no caso desta análise, que se revelou elevada o suficiente para provocar alterações ao nível do diâmetro. Tais alterações no acabamento das superfícies apresentam influência ao nível das dimensões finais obtidas pelos componentes.

(ii) Análise da Massa

Seguidamente são apresentados os valores obtidos na análise mássica dos parafusos, sendo os seus valores apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores da análise mássica dos parafusos.

Condição	Massa (g)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	$\bar{x} \pm \sigma_p$
C1	3,54	3,57	3,54	3,55±0,01
C2	3,69	3,71	3,54	3,64±0,08
C3	3,72	3,70	3,69	3,70±0,01
C4	3,49	3,47	3,51	3,49±0,02
C5	3,49	3,52	3,55	3,52±0,02
C6	3,44	3,41	3,39	3,41±0,02
C7	3,17	3,15	3,26	3,19±0,05
C8	3,54	3,57	3,56	3,56±0,01

O tratamento dos dados, tal como no caso da análise dimensional, foi realizado através de uma análise de variância dos valores obtidos, sendo os resultados apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados da ANOVA dos valores da análise mássica dos parafusos.

Parâmetro	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Variância	Valor de F	Valor de P
EpC (mm)	1	0,189038	0,189038	33,80	0,000
VeP (mm/s)	1	0,012150	0,012150	2,17	0,157
NdP	1	0,007004	0,007004	1,25	0,277
TeE (°C)	1	0,228150	0,228150	40,79	0,000
Erro	19	0,106271	0,005593	-	-
Total	23	0,542613	-	-	-

De acordo com a análise apresentada, os parâmetros considerados influentes para a massa dos parafusos impressos foram a espessura de camada e a temperatura de extrusão. De forma a melhor perceber a variação da massa com estes parâmetros é apresentado, na Figura 77, o gráfico das médias ajustadas de cada fator.

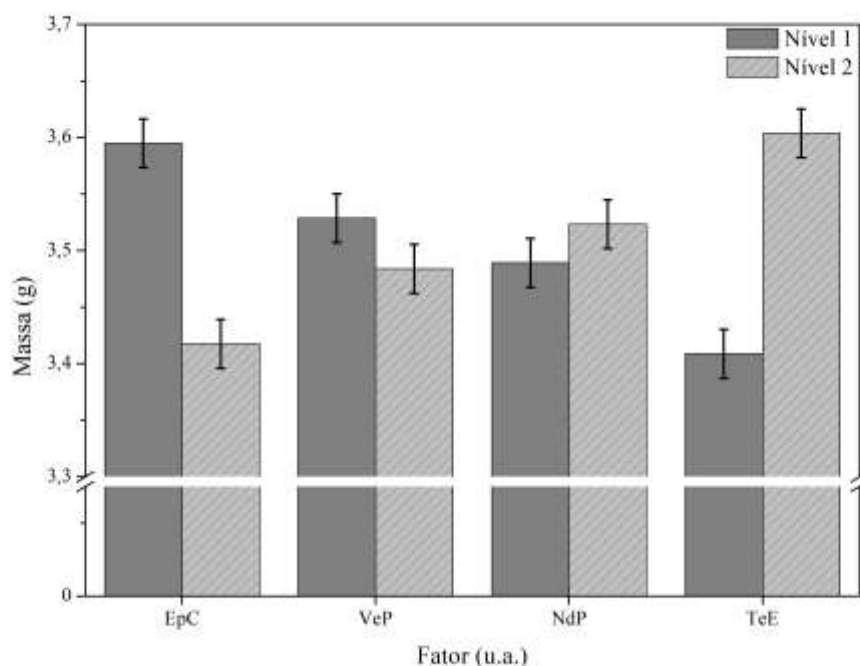


Figura 77 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros na massa dos parafusos.

Por análise do gráfico anterior é possível observar que as duas variáveis influentes apresentam variações inversas ao nível da massa do parafuso. Enquanto que um aumento na espessura de camada reduz o valor da massa, um aumento na temperatura de extrusão provoca um incremento na mesma.

No que toca à temperatura de extrusão, a influência na massa da peça pode ser explicada pela alteração na viscosidade do material a extrudir. Quando são submetidos a temperaturas mais elevadas, os termoplásticos como o PLA tendem a melhorar a sua maleabilidade e adesão, facilitando o processo de extrusão (Torres *et al.* 2015). Como tal, com o aumento de temperatura a quantidade de material extrudida tende a aumentar, verificando-se uma alteração na massa da peça final.

Relativamente à espessura de camada, como foi demonstrado no trabalho de Elkholy e Kempers (2018), existe uma correlação direta com o aumento da espessura de camada e a percentagem volúmica de ar nas peças impressas. Em suma, quando a espessura de camada é mais elevada as peças impressas apresentam uma densidade menor, visto que, quando comparados com o modelo CAD, apresentam mais ocos, provocando assim uma variação na massa medida.

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos da análise mássica das porcas. O procedimento seguido para esta análise foi em tudo similar a anterior, estando os valores obtidos discriminados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores da análise mássica das porcas.

Condição	Massa (g)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	$\bar{x} \pm \sigma_p$
C1	1,42	1,46	1,47	1,45±0,02
C2	1,43	1,46	1,44	1,44±0,01
C3	1,51	1,50	1,52	1,51±0,01
C4	1,38	1,37	1,40	1,38±0,01
C5	1,38	1,36	1,37	1,37±0,01
C6	1,32	1,35	1,35	1,34±0,02
C7	1,30	1,31	1,30	1,30±0,01
C8	1,38	1,37	1,40	1,38±0,01

Os resultados da análise de variância destes dados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados da ANOVA dos valores da análise mássica das porcas.

Parâmetro	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Variância	Valor de F	Valor de P
EpC (mm)	1	0,06	0,06	69,34	0,00
VeP (mm/s)	1	0,00	0,00	0,22	0,65
NdP	1	0,00	0,00	3,07	0,10
TeE (°C)	1	0,02	0,02	24,68	0,00
Erro	19	0,02	0,00	-	-
Total	23	0,09	-	-	-

Em seguida, tal como no caso anterior, é apresentado, na Figura 78, o gráfico das médias ajustadas para cada fator, sendo possível observar um comportamento em todo similar à análise mássica dos parafusos. Como tal, as justificações dos resultados obtidos pelos parafusos são igualmente aplicáveis às porcas.

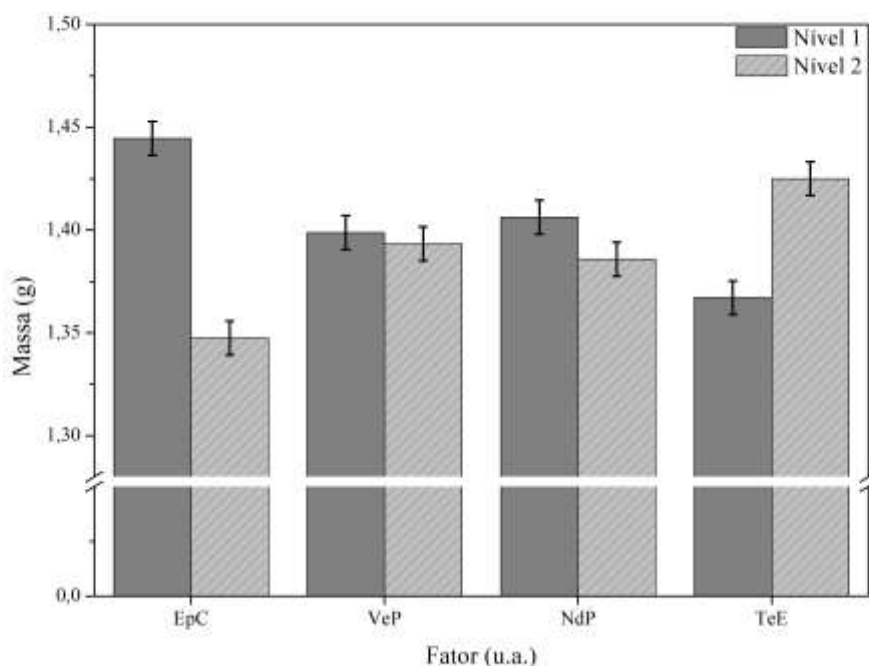


Figura 78 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros na massa das porcas.

(iii) Ensaios Mecânicos

Por fim, são analisados os valores dos ensaios mecânicos realizados aos parafusos. Na Tabela 18 são apresentados os valores máximos de força suportados pelos parafusos. Como é possível verificar por análise da tabela foram realizados três ensaios diferentes para cada condição.

Tabela 18 - Valores máximos das forças suportadas pelos parafusos nos diferentes ensaios.

Condição	Força (N)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	$\bar{x} \pm \sigma_p$
C1	575,00	613,17	382,05	523,41±101,16
C2	434,20	622,16	323,03	459,80±123,46
C3	578,14	590,86	167,01	445,34±196,88
C4	633,55	475,29	273,55	460,80±147,32
C5	447,68	770,01	209,46	475,72±229,70
C6	483,21	801,93	714,43	666,52±134,45
C7	586,65	754,63	810,08	717,12±94,99
C8	685,28	400,49	976,28	687,35±235,07

Com os valores apresentados anteriormente foi possível realizar uma análise de variância aos valores obtidos, sendo os resultados da mesma apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultado da ANOVA da análise dos resultados dos ensaios mecânicos.

Parâmetro	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Variância	Valor de F	Valor de P
EpC (mm)	1	162052	162052	4,22	0,054
VeP (mm/s)	1	12856	12856	0,33	0,57
NdP	1	4779	4779	0,12	0,73
TeE (°C)	1	33672	33672	0,88	0,36
Erro	19	38435	38435	-	-
Total	23	943630	-	-	-

De forma a melhor compreender a influência dos parâmetros nos resultados obtidos, é apresentado o gráfico das médias ajustadas a cada fator na Figura 79.

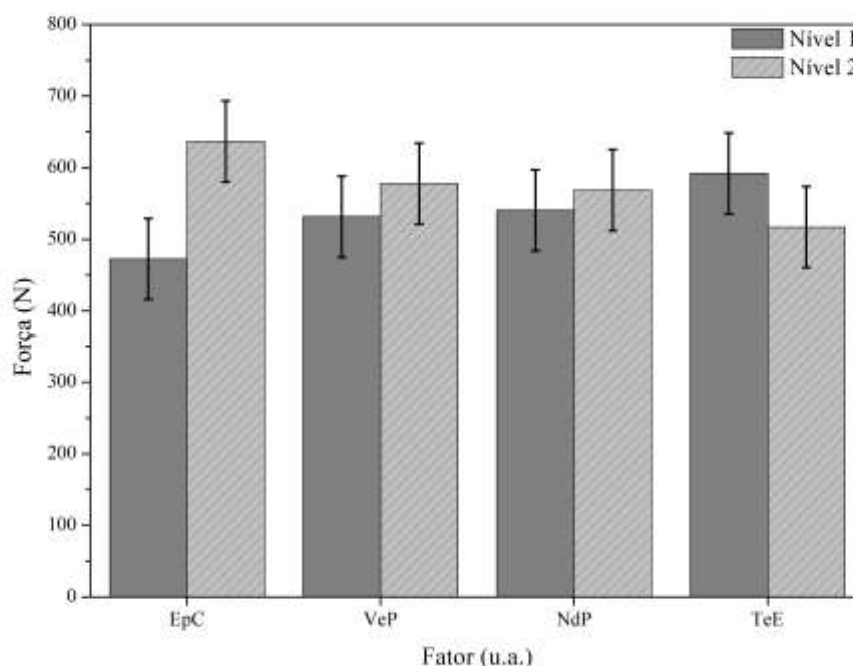


Figura 79 – Representação da influência dos níveis dos parâmetros nos resultados dos ensaios mecânicos.

Através dos valores obtidos na análise ANOVA é possível verificar que nenhum dos parâmetros em estudo foi considerado influente ao nível da variação dos valores dos ensaios mecânicos. No entanto, o parâmetro espessura de camada aproxima-se do valor limite para ser considerado influente. De facto, por análise da Figura 79 é possível observar que é neste parâmetro que a diferença entre valores é mais acentuada, não sendo, no entanto, suficiente para que seja considerado influente, com um intervalo de confiança de 95%.

Os gráficos força/deslocamento, resultantes da realização dos ensaios mecânicos, podem ser encontrados no Anexo D, estando estes agrupados por condição ensaiada. Na Figura 80 é apresentado um gráfico força/deslocamento que contém a condição que atingiu a maior força (condição 8), a menor (condição 7) e um valor intermédio (condição 2).

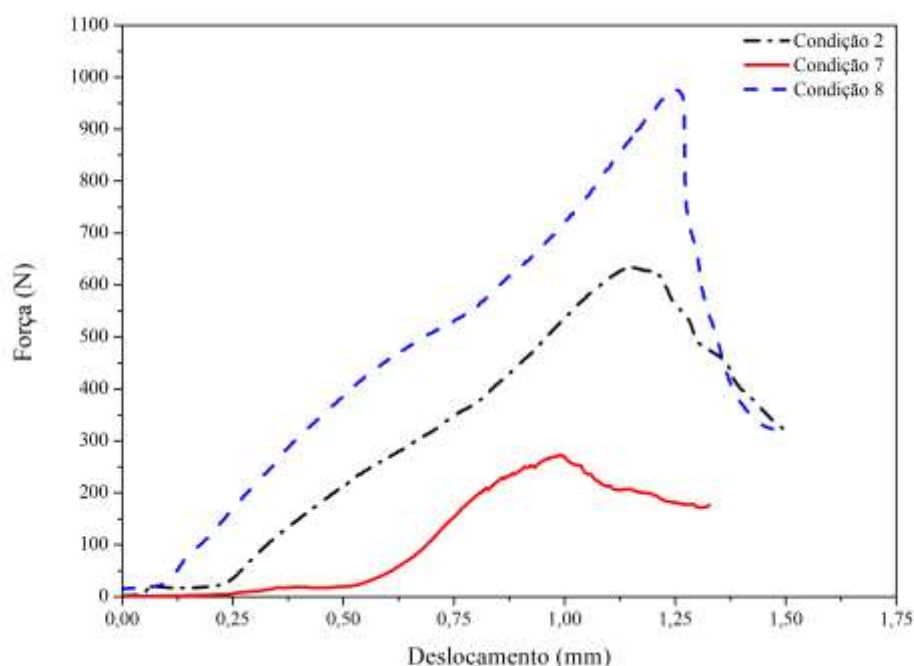


Figura 80 - Gráfico Força/Deslocamento dos ensaios com maior resistência mecânica de cada condição

A variação entre valores de força máxima com a alteração da espessura de camada é um fenómeno que também foi observado nos estudos de Samykano *et al.* (2019), Deng *et al.* (2018), Chacón *et al.* (2017), Liu *et al.* (2017) e Mishra e Mahapatra (2014). De facto, a espessura de camada afeta a largura e espessura do material depositado, o que influencia os fenómenos de ligação entre camada e por consequência as propriedades mecânicas das peças obtidas (Deng *et al.* 2018).

Relativamente à espessura de camada e como os parafusos forma construídos na direção vertical, os resultados do estudo são similares aos do trabalho de Chacón *et al.* (2017). Neste trabalho os autores justificam o aumento da força com a utilização de uma espessura de camada superior através da redução do número de camadas necessária para construir a peça. Tal redução resulta num menor número de zonas de maior fragilidade da peça, aumentando assim a força suportada.

A ligeira diferença entre valores relativos às velocidades de preenchimento dos perímetros é também abordada pelo estudo de Deng *et al.* (2018), tendo obtido valores similares no que toca a este parâmetros. No seu estudo concluiu-se que a velocidade de preenchimento que mais favorecia a força seria a de 60mm/s, como foi verificado nesta análise.

O ligeiro aumento dos valores de força com o aumento do numero de perímetros da peça pode ser explicado com a mudança da zona de concentração de tensões da periferia da peça para uma zona mais interior, tal como verificado por Raut *et al.* (2014).

No que toca à temperatura de extrusão, verificou-se uma diminuição da força suportada pelos parafusos em estudo quando a extrusão se dá aos 215°C. Este parâmetro é altamente influenciado por duas variáveis: o material utilizado e o equipamento de impressão. A literatura apenas define que a temperatura de extrusão do material deve rondar os 230°C, no caso do PLA,

podendo haver variações da mesma tendo em conta as variáveis em questão. Como tal, uma temperatura que pode ser considerada ideal para um dado conjunto equipamento/material pode não se verificar quando uma destas variáveis se altera (Gordon *et al.* 2016). No caso apresentado verificou-se que a temperatura que obteve melhores resultados nos ensaios mecânicos foi a de 185°C.

De facto, tal como foi referido na secção 4.2 - Orientação de construção, dado que o processo de FDM se trata de uma sobreposição sequencial de camadas, as interfaces de ligação originam zonas de concentrações de tensões elevadas que, por sua vez, constituem secções de maior fragilidade na peça (Redwood, Schffer e Garret 2017). Como no estudo apresentado os parafusos foram construídos na orientação vertical, ao longo do seu comprimento não existe um segmento contínuo de material, fator esse que diminui a força suportada pelo componente.

A variação da orientação de construção é apresentada como um dos fatores mais influentes ao nível da força, sendo tal hipótese corroborada pelos estudos de Chacón *et al.* (2017), Liu *et al.* (2017), Raut *et al.* (2014) e Mishra e Mahapatra (2014), que indicam que, para o caso apresentado, a orientação mais indicada seria a horizontal (referência à Figura 52).

Em suma, tendo em conta a importância da orientação de construção no comportamento destes componentes, a falta de significância dos parâmetros em estudo pode ser explicada pela exclusão do fator que, em teoria, seria o mais influente, afetando assim os resultados obtidos.

De forma a verificar os resultados obtidos através do ensaio mecânico dos parafusos, foram analisados os valores relativos aos ensaios de tração dos provetes obtidos com as mesmas condições que os parafusos. Na Figura 81 é apresentada a curva tensão/deformação do provete que apresentou a maior tensão máxima, o da condição 5, podendo-se encontrar as restantes curvas no Anexo E. Posteriormente, na Figura 82 é apresentada a superfície de fratura do mesmo provete. As imagens referentes às restantes condições podem ser encontradas no Anexo F.

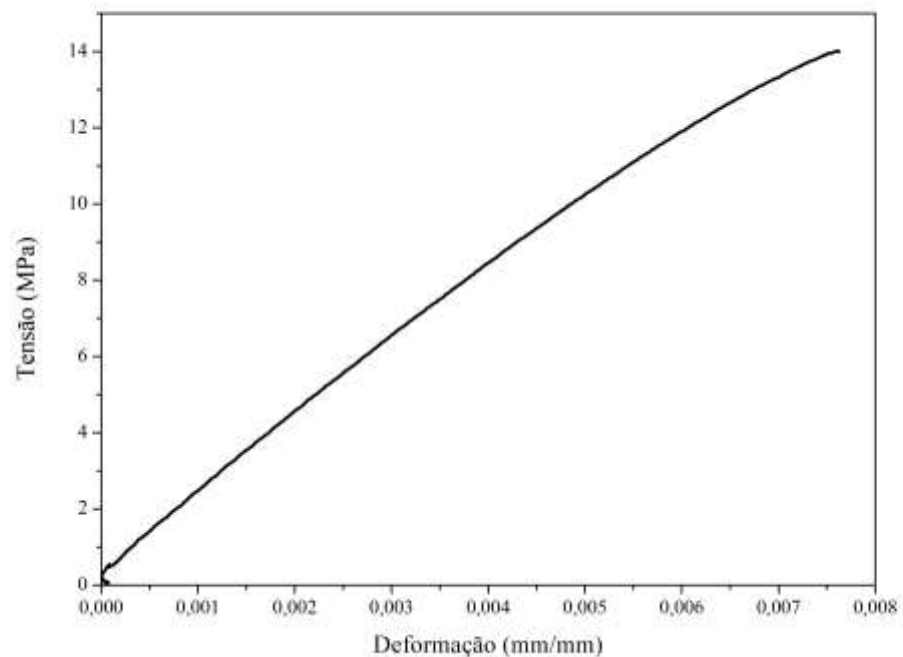


Figura 81 - Curva tensão/deformação do provete da condição 5.



Figura 82 - Superfície de fratura do provete da condição 5.

Dos ensaios de tração é possível obter dois valores para cada condição: a tensão máxima atingida pelo provete e o módulo de Young do mesmo. Os resultados obtidos para cada condição são apresentados na Tabela 20. Dado que os provetes apresentaram um comportamento frágil, a tensão de rutura obtida, na grande maioria das condições ensaiadas, a tensão máxima é coincidente com a tensão limite elástico.

Tabela 20 - Valores de tensão de ruptura e módulo de Young obtidos pelos ensaios de tração dos provetes.

Condição	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (GPa)
C1	15,85	2,54
C2	8,96	2,45
C3	9,68	2,46
C4	11,33	2,34
C5	14,02	1,89
C6	5,49	1,52
C7	6,67	1,57
C8	11,32	1,71

Estes resultados foram posteriormente alvo de uma análise de variância, de forma a melhor compreender a influência dos parâmetros em tais valores. Primeiramente são analisados os valores da análise de variância da tensão máxima, sendo apresentados os valores da análise ANOVA na Tabela 21 e o gráfico das médias ajustadas a cada fator na Figura 83.

Tabela 21 - Resultado da ANOVA da análise dos resultados dos valores de tensão de ruptura obtidos pelos ensaios à tração dos provetes.

Parâmetro	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Variância	Valor de F	Valor de P
EpC (mm)	1	8,66	8,66	0,43	0,56
VeP (mm/s)	1	3,53	3,53	0,18	0,70
NdP	1	10,38	10,38	0,52	0,52
TeE (°C)	1	2,70	2,70	0,14	0,74
Erro	3	59,82	19,94	-	-
Total	7	-	-	-	-

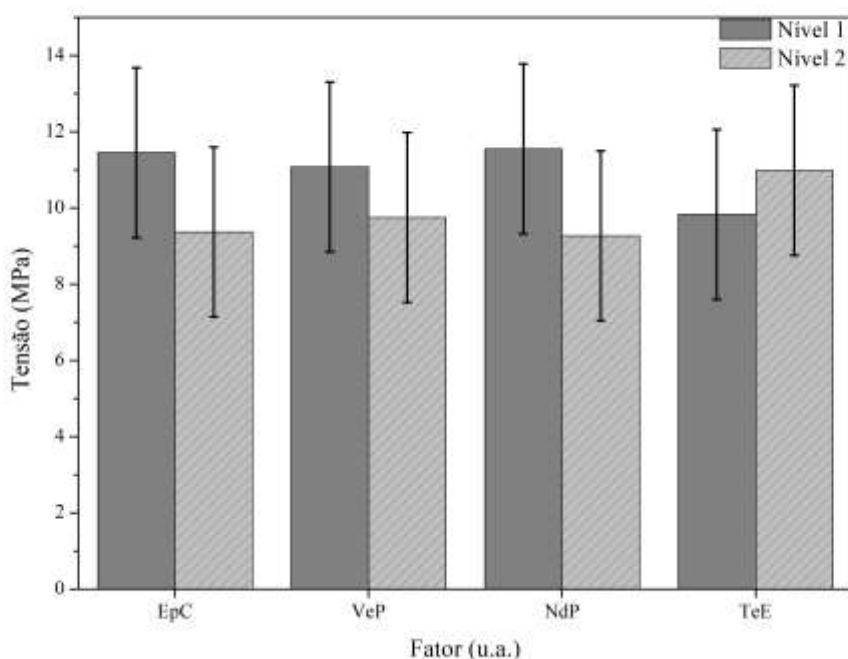


Figura 83 - Representação da influência dos níveis dos parâmetros nos valores de tensão de ruptura obtidos nos ensaios à tração dos provetes.

Por análise dos valores apresentados é possível concluir que nenhum dos parâmetros em estudo foi considerado influente para a tensão máxima dos provetes ensaiados.

Seguidamente são apresentados os resultados da análise ANOVA, na Tabela 22, e o gráfico de medias ajustadas a cada fator, na Figura 84, relativos ao estudo do módulo de Young.

Tabela 22 - Resultado da ANOVA da análise dos resultados dos valores de Módulo de Young obtidos pelos ensaios à tração dos provetes.

Parâmetro	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Variância	Valor de F	Valor de P
EpC (mm)	1	1,20	1,20	120,48	0,00
VeP (mm/s)	1	0,01	0,01	1,42	0,32
NdP	1	0,02	0,02	2,42	0,22
TeE (°C)	1	0,03	0,03	3,42	0,16
Erro	3	0,03	0,01	-	-
Total	7	-	-	-	-

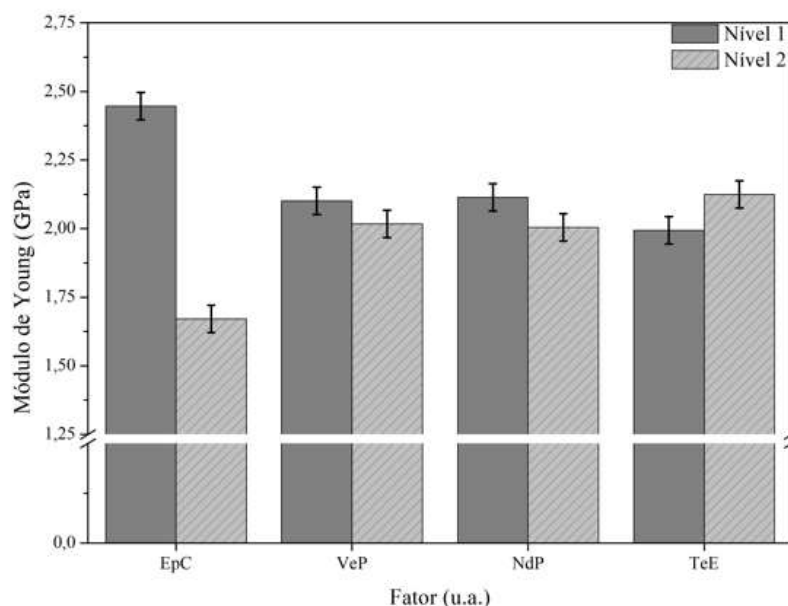


Figura 84 - Representação da influência dos níveis dos parâmetros nos valores de módulo de Young obtidos nos ensaios à tração dos provetes (Valor teórico 3,6 GPa).

Dos valores anteriormente apresentados é possível concluir que o módulo de Young dos provetes testados é estatisticamente influenciado pela espessura de camada utilizada, sendo o mesmo favorecido quando este parâmetro tem o valor de 0,1mm. Os restantes parâmetros não foram considerados influentes para a análise em questão.

Estes resultados são corroborados pelo trabalho de Ezoji, Razavi-Nouri e Rezadoust (2016) que relaciona a diminuição do módulo de Young com o aumento da espessura de camada através do aumento do espaçamento entre filamentos de preenchimento. Valores similares foram obtidos pelo estudo de Carey et al. (2015) tendo sido a influência deste parâmetro justificada com a resolução do equipamento utilizado. Com o aumento da espessura de camada os autores verificaram que o valor da espessura dos provetes era menor que o expectável. As variações de espessura foram então consideradas o fator responsável de tal variância no módulo de Young.

O trabalho de Kovan, Altan e Topal (2017) estudou os efeitos da espessura de camada e orientação de construção em juntas adesivas, cujo substrato foi fabricado por FDM em PLA que foram submetidas a um ensaio à tração. Verificaram que a utilização de uma espessura de camada mais reduzida favorecia os resultados obtidos, nomeadamente o módulo de Young, que se verificava superior para as peças obtidas com a menor espessura de camada em estudo.

A influência da espessura de camada no módulo de Young dos provetes obtidos constitui uma possível explicação para o facto deste parâmetro se aproximar do valor limite para ser considerado influente nos ensaios mecânicos dos parafusos. De facto, pela análise anteriormente apresentada, é possível concluir que este influencia os valores da região elástica dos ensaios de tração, não se verificando a mesma influência no que toca ao domínio plástico, uma vez que estes provetes apresentam na sua maioria um comportamento frágil.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação da qualidade de parafusos e porcas obtidos num equipamento de impressão 3D de baixo custo. Após as diferentes análises que os elementos fabricados foram sujeitos concluiu-se que o equipamento utilizado apresentava capacidade para construir estes elementos, salvo algumas restrições.

Ao nível da dimensão dos componentes foi verificado que, com o equipamento utilizado, o valor mínimo para o qual se poderiam obter componentes funcionais seria com parafusos e porcas M10. Esta limitação é justificada com dois fatores associados à máquina utilizada: o diâmetro do bico extrusor e a espessura de camada.

A conjugação destes fatores é responsável pela determinação da resolução do equipamento, sendo que, no caso apresentado, o bico extrusor apresentava um diâmetro de 0,4mm e a espessura de camada mínima do equipamento era de 0,1mm. A alteração de algum destes componentes influenciaria a resolução do equipamento e, por consequência, modificava o valor mínimo de dimensão dos parafusos e porcas.

Em termos da estratégia de construção dos elementos observou-se que o fator mais limitante desta seria a orientação de construção. De facto, a única orientação na qual foi possível imprimir elementos com qualidade satisfatória foi a vertical, havendo uma deterioração na qualidade dos elementos quando impressos nas restantes orientações.

A deterioração dos elementos impressos em orientações que não a vertical deve-se à necessidade de adição de estruturas de suporte. Tais estruturas são construídas, na impressora utilizada, com o mesmo material que constitui o componente a imprimir. Como tal, a sua remoção é um processo que implica danos na superfície onde tal estrutura é adicionada.

A utilização de uma estrutura de suporte solúvel seria uma potencial solução para esta limitação. No entanto, para ser possível imprimir este tipo de estrutura seriam necessários, no mínimo dois bicos extrusores diferentes, característica cujo equipamento utilizado não apresentava.

Na análise dos resultados dos ensaios mecânicos concluiu-se que os parafusos impressos obtiveram resultados satisfatórios, tendo atingido valores de força máxima de 976,28N. Dentro dos diferentes parâmetros de processo utilizados, nenhum foi considerado influente, tendo-se verificado que a espessura de camada foi o que mais se aproximou de tal.

Relativamente aos ensaios dos provetes, foi concluído que nenhum parâmetro foi considerado influente ao nível da tensão de rutura. No entanto, no que toca ao módulo de Young a espessura de camada verificou-se influente. Tal permite concluir que a espessura de camada utilizada na impressão relaciona-se com o comportamento dos parafusos quando estes se encontram no regime elástico.

Como os parafusos obtidos apresentavam um comportamento frágil, a variação do módulo de Young é um fator que altera bastante o comportamento dos ensaios realizados, visto que dita a sua resposta na grande maioria do seu comportamento. Tal fator justifica a aproximação do valor de prova da espessura de camada ao limite de ser considerado influente.

Por consulta da literatura, a orientação de construção seria um parâmetro de elevado interesse de estudar ao nível das propriedades mecânicas das peças obtidas, dado que, em estudos anteriores, este foi um dos parâmetros mais importantes no que toca à resistência mecânica das peças obtidas. Por não ter sido incluído neste estudo as análises realizadas não incluíram um dos fatores que, teoricamente, seria dos mais relevantes.

5.2 Trabalhos futuros

Neste tópico são apresentadas sugestões para possíveis trabalhos futuros, sendo estas subdivididas entre os diversos aspetos analisados no presente trabalho.

Em termos da análise de parâmetros, seria de interesse estudar o comportamento dos componentes fabricados quando submetidos a diversos ciclos de utilização, de forma a estudar a influencia de parâmetros na longevidade dos componentes fabricados. Seria também relevante analisar o comportamento dos parafusos quando submetidos a esforços de tração e à fadiga, seja ela à tração ou ao corte. Um mecanismo para tal ensaio foi modelado no presente trabalho, encontrando-se no Anexo G. Tal equipamento utiliza um motor de passo para efetuar a rotação do componente “macho” e possui um carrinho onde se encontra fixo o elemento “fêmea”. A rotação do “macho” provoca a transladação do carrinho, verificando-se assim o enroscar de ambos os elementos. Fruto das restrições de tempo associadas ao trabalho desenvolvido, tal estudo não foi realizado. O mecanismo construído é apresentado na Figura 85.

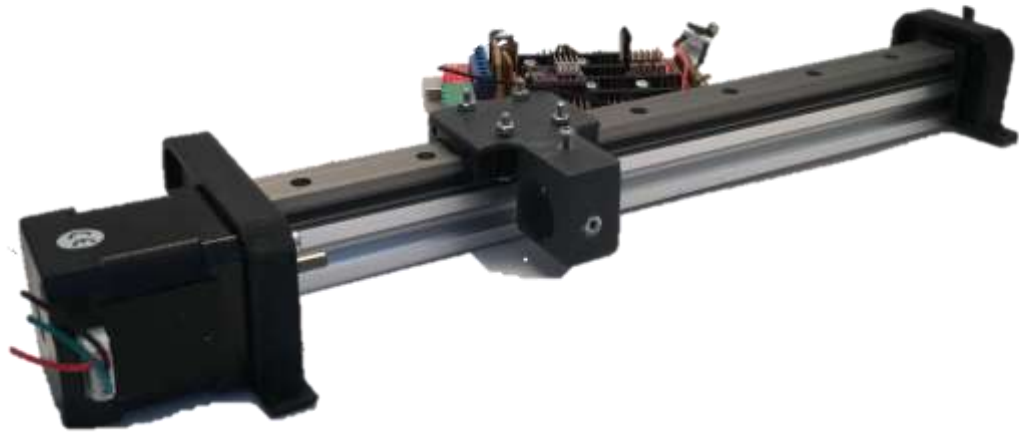


Figura 85 - Mecanismo de ensaio ao desgaste.

A análise de componentes produzidos com diferentes orientações de construção seria também de elevado interesse, sendo que tal seria possível com recurso a um equipamento que permitisse a extrusão de dois materiais diferentes. Um dos materiais seria utilizado na construção dos componentes e outro para o suporte, sendo que seria utilizado um material solúvel, de forma a preservar ao máximo a integridade estrutural dos componentes produzidos.

Seria também de relevante interesse estudar e desenvolver um perfil de rosca otimizado para este processo de fabrico.

A utilização de diferentes materiais para produzir os componentes, dos quais se destaca o POM (*Polyoxymethylene*), seria um fator que poderia ser tido em consideração em estudos futuros.

Referências

- Agarwala, Mukesh K., Vikram R. Jamalabad, Noshir A. Langrana, Ahmad Safari, Philip J. Whalen e Stephen C. Danforth. 1996. "Structural quality of parts processed by fused deposition". 2, no. 4: 4-19. doi:10.1108/13552549610732034. <https://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552549610732034>.
- Akhoundi, B. e A. H. Behravesht. 2019. "Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products". *Experimental Mechanics*. 10.1007/s11340-018-00467-y. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-00467-y>.
- Alafaghani, Ala'aldin, Ala Qattawi, Buraq Alrawi e Arturo Guzman. 2017. "Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach". *Procedia Manufacturing* 10: 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917302615>.
- Alhubail, Mohammad. 2012. "Statistical-based optimization of process parameters of fused deposition modelling for improved quality". University of Portsmouth.
- Ali, Fahraz, Boppana V Chowdary e Justin Maharaj. 2014. "Influence of some process parameters on build time, material consumption, and surface roughness of FDM processed parts: inferences based on the Taguchi design of experiments". Comunicação apresentada em Proceedings of The 2014 IACJ/ISAM Joint International Conference.
- ASTM, ISO. 2015. Standard terminology for additive manufacturing—general principles—terminology. ASTM International West Conshohocken, PA.
- Ayrilmis, Nadir. 2018. "Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament". *Polymer Testing* 71: 163-66. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.09.009>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941818311437>.
- Beniak, J., P. Križan, L Šooš e M. Matúš. 2019. "Research on Shape and Dimensional Accuracy of FDM Produced Parts". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 501: 012030. 10.1088/1757-899x/501/1/012030. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/501/1/012030>.
- Bickford, John H. 2007. *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints*. 10.1201/9780849381874.
- Böllhoff. 2007. The Manual of Fastening Technology. edição de Böllhoff GmbH. https://www.boellhoff.com/static/pdf/downloadcenter/MoFT_8100.pdf.
- Carbas, Ricardo João Camilo. 2008. "Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi". Mestre, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Carey, Jason P., Jonathon S. Schofield, Garrett W. Melenka e Michael R. Dawson. 2015. "Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D

- desktop printer". *Rapid Prototyping Journal* 21, no. 5: 618-27. 10.1108/RPJ-09-2013-0093. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2013-0093>.
- Chacón, J. M., M. A. Caminero, E. García-Plaza e P. J. Núñez. 2017. "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection". *Materials & Design* 124: 143-57. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517303143>.
- Coelho, Pedro Afonso Antunes. 2014. "Fabrico por Enformação de Porcas e Parafusos Ocos de Parede Fina". Mestre, Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090413667/dissertacao.pdf>.
- Cotteleer, Mark, Jonathan Holdowsky e Monika Matho. 2013. "The 3D oportunity primer: The basics of additive manufacturing". *Deloitte University Press*.
- Deng, Xiaohu, Zhi Zeng, Bei Peng, Shuo Yan e Wenchao Ke. 2018. "Mechanical Properties Optimization of Poly-Ether-Ether-Ketone via Fused Deposition Modeling". *Materials* 11, no. 2: 216. <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/2/216>.
- Durão, Luiz Fernando C. S., Richard Barkoczy, Eduardo Zancul, Linda Lee Ho e Renan Bonnard. 2019. "Optimizing additive manufacturing parameters for the fused deposition modeling technology using a design of experiments". *Progress in Additive Manufacturing*. 10.1007/s40964-019-00075-9. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00075-9>.
- El Magri, Anouar, Khalil El Mabrouk, Sébastien Vaudreuil e Mohamed Ebn Touhami. 2019. "Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling". *Journal of Thermoplastic Composite Materials*: 0892705719847244. 10.1177/0892705719847244. <https://doi.org/10.1177/0892705719847244>.
- Elkholy, Ahmed e Roger Kempers. 2018. "Investigation into the Influence of Fused Deposition Modeling (FDM) Process Parameters on the Thermal Properties of 3D-Printed Parts".
- Engineers, N.B.C. 2008. *The Complete Technology Book on Steel and Steel Products (Fasteners, Seamless Tubes, Casting, Rolling of Flat Products & others): How to start steel rolling mill, Iron and Steel making by-Products, Manufacturing of Steel, Manufacturing Process for Steel products, Metal Fasteners Manufacturing, Mill Automation for Pipe and Tubing Production, Modern Rolling Plant, Modern small and cottage scale industries, Most Profitable Steel Business Ideas, New small scale ideas in Steel rolling industry, Opportunity Steel Rolling Mill, Plate Mill, Production of Welded Pipe, Profitable small and cottage scale industries*. NIIR Project Consultancy Services. <https://books.google.pt/books?id=39uZAgAAQBAJ>.
- Ezaji, Maryam, Mohammad Razavi-Nouri e Amir Masood Rezaoust. 2016. "Influence of Layer Thickness on the Tensile Properties of the Samples Manufactured by Fused Deposition Modelling". *Technology* 2: 5.
- Fischer, Fred. 2018. *Thermoplastics: The Strongest Choice For 3D Printing*.
- Gibson, Ian, David Rosen e Brent Stucker. 2015. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition*. 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- Gold, Scott A. e Brian N. Turner. 2015. "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness". *Rapid Prototyping Journal* 21, no. 3: 250-61. 10.1108/RPJ-02-2013-0017. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2013-0017>.

- González, S.G. 2016. *Impresión 3D*. Marcombo. <https://books.google.pt/books?id=VezkDAEACAAJ>.
- Gooch, Jan W. 2011. "ASTM D638". Em *Encyclopedic Dictionary of Polymers*, edição de Jan W. Gooch, 51-51. New York, NY: Springer New York. 10.1007/978-1-4419-6247-8_856. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6247-8_856.
- Gordon, Ali P., Matthew Cole, Zachary DeMastry, Jonathan Torres e Allen Owji. 2016. "An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments". *Rapid Prototyping Journal* 22, no. 2: 387-404. 10.1108/RPJ-07-2014-0083. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2014-0083>.
- Górski, F., W. Kuczko e R. Wichniarek. 2013. "Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using fused deposition modelling technology". *Advances in Science and Technology Research Journal* Vol. 7, nr 19: 27-35.
- Goulding, Charles. 2017. R&D Tax Aspects of 3D Printed Fasteners. CES EduPack (Database).
- Grasso, Marzio, Massimo Martorelli, Antonio Lanzotti e Gabriele Staiano. 2015. "The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer". *Rapid Prototyping Journal* 21, no. 5: 604-17. 10.1108/RPJ-09-2014-0135. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0135>.
- Huang, Bai, Shuna Meng, Hui He, Yunchao Jia, Yingbin Xu e Huankun Huang. 2019. "Study of processing parameters in fused deposition modeling based on mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene filament". *Polymer Engineering & Science* 59, no. 1: 120-28. 10.1002/pen.24875. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.24875>.
- International Organization for, Standardization. 2012. ISO 527-1:2012 - Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles.
- ISO. 1999. "4032". *Hexagon nuts, style 1-Product grades A and B (ISO 4032)*.
- . 2011. "4014: 2011 Hexagon head bolts". *Product grades A and B BSI*.
- Juvinall, Robert C. 2017. *Fundamentals of machine component design*. Sixth edition. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Kamax. 2015. Bolt and Screw Compendium. edição de Kamax.
- Kaveh, Mahdi, Mohsen Badrossamay, Ehsan Foroozmehr e Ardeshtir Hemasian Etefagh. 2015. "Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes". *Journal of Materials Processing Technology* 226: 280-86. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.012>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615300637>.
- Kohad, Ashay e Rajendra Dalu. 2017. "Optimization of Process Parameters in Fused Deposition Modeling : A Review". Comunicação.
- Kovan, Volkan, Gurkan Altan e Eyup Sabri Topal. 2017. "Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints". *Journal of Mechanical Science and Technology* 31, no. 5: 2197-201. 10.1007/s12206-017-0415-7. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0415-7>.
- Kumar, S, V Nirmal Kannan e G Sankaranarayanan. 2014. "Parameter optimization of ABS-M30i parts produced by fused deposition modeling for minimum surface roughness". *International Journal of Current Engineering and Technology* 3: 93-97.

- Lanaro, Matthew, David P. Forrestal, Stefan Scheurer, Damien J. Slinger, Sam Liao, Sean K. Powell e Maria A. Woodruff. 2017. "3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation". *Journal of Food Engineering* 215: 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877417302753>.
- Leary, Martin, Mohammad Babaei, Milan Brandt e Aleksandar Subic. 2013. "Feasible build orientations for self-supporting fused deposition manufacture: a novel approach to space-filling tessellated geometries". Comunicação apresentada em Advanced Materials Research.
- Lee, Yung-Li e Hsin-Chung Ho. 2012. "Chapter 12 - Design and Analysis of Metric Bolted Joints: VDI Guideline and Finite Element Analysis". Em *Metal Fatigue Analysis Handbook*, edição de Yung-Li Lee, Mark E. Barkey e Hong-Tae Kang, 461-513. Boston: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385204-5.00012-4>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123852045000124>.
- Leite, M, J Cunha, M Sardinha, B Soares, L Reis e AR Ribeiro. 2018. "TOOL PATH GENERATION FOR HYBRID ADDITIVE MANUFACTURING".
- Liu, Xinhua, Mingshan Zhang, Shengpeng Li, Lei Si, Junquan Peng e Yuan Hu. 2017. "Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89, no. 5: 2387-97. 10.1007/s00170-016-9263-3. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9263-3>.
- Luzanin, Ognjan, Vera Guduric, Ivan Ristic e Simon Muhic. 2017. "Investigating impact of five build parameters on the maximum flexural force in FDM specimens – a definitive screening design approach". *Rapid Prototyping Journal* 23, no. 6: 1088-98. 10.1108/RPJ-09-2015-0116. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2015-0116>.
- ManufacturingGuide. 2016. "Fused Deposition Modeling,FDM". Acedido a 25/5/2019. <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>.
- McCarthy, M. A., V. P. Lawlor, W. F. Stanley e C. T. McCarthy. 2002. "Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints". *Composites Science and Technology* 62, no. 10: 1415-31. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00088-X).
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635380200088X>.
- Minitab. 2019. Tabela de análise de variância para Ajustar modelo linear generalizado.
- Mishra, Swayam Bikash e Siba Sankar Mahapatra. 2014. "Improvement in Tensile Strength of FDM Built Parts by Parametric Control". *Applied Mechanics and Materials* 592-594: 1075-79. 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.1075.
<https://www.scientific.net/AMM.592-594.1075>.
- Mohamed, Omar A., Syed H. Masood e Jahar L. Bhowmik. 2015. "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects". *Advances in Manufacturing* 3, no. 1: 42-53. 10.1007/s40436-014-0097-7. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.
- Mohamed, Omar Ahmed, Syed Hasan Masood e Jahar Lal Bhowmik. 2016. "Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion". *Measurement* 81: 174-96. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.011>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224115006703>.

- Oldakowski, Matthew, Intan Oldakowska, Thomas Kirk, Chris T Ford, Tim Sercombe, Philip Hardcastle e Robert Day. 2016. *Pull-out strength comparison of a novel expanding fastener against an orthopaedic screw in an ovine vertebral body: An ex-vivo study*. Vol. 40. 10.3109/03091902.2015.1127441.
- Papazetis, George e George-Christopher Vosniakos. 2019. "Feature-based process parameter variation in continuous paths to improve dimensional accuracy in three-dimensional printing via material extrusion". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*: 0954405419838361. 10.1177/0954405419838361. <https://doi.org/10.1177/0954405419838361>.
- Pérez, Mercedes, Gustavo Medina-Sánchez, Alberto García-Collado, Munish Gupta e Diego Carou. 2018. "Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters". *Materials* 11, no. 8: 1382. <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1382>.
- Rajesh, S., B. Vijaya Ramnath, C. Elanchezhian, Akash Chowdhury, Ashwin Sathya e K. R. Deepak. 2018. "Review on Testing of Polymer Fasteners*". *Materials Today: Proceedings* 5, no. 1, Part 1: 1817-23. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.280>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317325488>.
- Ranellucci, Alessandro. 2013. "Reprap/Slic3r and the future of 3D printing". *Canessa, E., Fonda, C., and Zennaro, ed., "Low-cost 3D Printing for Science, Education, and Sustainable Development*: 75-82.
- Raut, Sandeep, VijayKumar S. Jatti, Nitin K. Khedkar e T. P. Singh. 2014. "Investigation of the Effect of Built Orientation on Mechanical Properties and Total Cost of FDM Parts". *Procedia Materials Science* 6: 1625-30. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.146>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812814005112>.
- Redwood, Ben, Filemon Schffer e Brian Garret. 2017. *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs.
- Relvas, Carlos Alberto Moura. 2018. *O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital*. Edição de Engebook. 07-2018 ed.
- Roberson, D. A., D. Espalin e R. B. Wicker. 2013. "3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model". *Virtual and Physical Prototyping* 8, no. 3: 201-12. 10.1080/17452759.2013.830939. <https://doi.org/10.1080/17452759.2013.830939>.
- Samanta, Akash e Arindam Dutta. 2012. *A Noble Approach of Process Automation in Galvanized Nut, Bolt Manufacturing Industry*. Vol. 1. 10.11591/ijra.v1i2.346.
- Samykano, M., S. K. Selvamani, K. Kadirgama, W. K. Ngui, G. Kanagaraj e K. Sudhakar. 2019. "Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 10.1007/s00170-019-03313-0. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03313-0>.
- Santana, Leonardo. 2015. "Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA". Mestre, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/160786>.
- Santana, Leonardo, Jorge Lino Alves e Aurélio da Costa Sabino Netto. 2017. "A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality". *Materials & Design* 135: 159-72. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.020>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517308523>.

- Santana, Leonardo, Claudia Merlini, Guilherme Barra, Carlos Henrique Ahrens e Aurélio da Costa Sabino Netto. 2015. *AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE FILAMENTOS DE PLA PARA IMPRESSORAS 3D DE CÓDIGO ABERTO*. 10.20906/CPS/CON-2016-0378.
- Shigley, J. E., C. R. Mischke e R. G. Budynas. 2008. *Shigley's Mechanical Engineering Design - 9th Ed.* 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- Simões Morais, José Manuel de. 2012. *Desenho Técnico Básico - 3*. Edição de José Manuel de Simões Morais. 23 ed. Desenho Técnico Básico: Porto Editora.
- Speck, J.A. 2018. *Mechanical Fastening, Joining, and Assembly*. CRC Press. <https://books.google.pt/books?id=ZHm3BgAAQBAJ>.
- Spišák, Emil, Ivan Gajdoš e Ján Slota. 2014. "Optimization of FDM Prototypes Mechanical Properties with Path Generation Strategy". *Applied Mechanics and Materials* 474: 273-78. 10.4028/www.scientific.net/AMM.474.273. <https://www.scientific.net/AMM.474.273>.
- Subramaniam, S. R., M. Samykano, S. K. Selvamani, W. K. Ngui, K. Kadirgama, K. Sudhakar e M. S. Idris. 2019. "Preliminary investigations of polylactic acid (PLA) properties". *AIP Conference Proceedings* 2059, no. 1: 020038. 10.1063/1.5085981. <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5085981>.
- Sudin, Mohd Nizam, Shamsul Anuar Shamsudin e Mohd Azman Abdullah. 2016. "Effect of part features on dimensional accuracy of FDM model". *APRN Journal of Engineering and Applied Sciences*: 8067-72.
- Tian, Xiaoyong, Tengfei Liu, Chuncheng Yang, Qingrui Wang e Dichen Li. 2016. "Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 88: 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.032>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X16301695>.
- Torres, Jonathan, José Coteló, Justin Karl e Ali P. Gordon. 2015. "Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives". *JOM* 67, no. 5: 1183-93. 10.1007/s11837-015-1367-y. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1367-y>.
- Vanek, J., J. A. G. Galicia e B. Benes. 2014. "Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication". *Computer Graphics Forum* 33, no. 5: 117-25. 10.1111/cgf.12437. <https://doi.org/10.1111/cgf.12437>.
- Vijay, P, P Danaiah e KVD Rajesh. 2011. "Critical parameters effecting the rapid prototyping surface finish". *Journal of Mechanical Engineering and Automation* 1, no. 1: 17-20.
- Volpato, Neri, Carlos Henrique Ahrens, André Luiz Jardini Munhoz, Carlos Costa, Jonas De Carvalho, Jorge dos Santos, Jorge Silva, José Foggatto e Milton Sergio Fernandes de Lima. 2017. *Manufatura Aditiva - Tecnologias e aplicações da impressão 3D*.
- Wang, Peng, Bin Zou, Hongchuan Xiao, Shouling Ding e Chuanzhen Huang. 2019. "Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK". *Journal of Materials Processing Technology* 271: 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.016>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619301049>.
- Wohlers, Terry. 2019. "Wohlers report". *Wohlers Associates Inc.*
- Wu, Wenzheng, Peng Geng, Guiwei Li, Di Zhao, Haibo Zhang e Ji Zhao. 2015. "Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK

- and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS". *Materials* 8, no. 9: 5834-46. <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/9/5271>.
- Würth. 2019. Manufacturing screws and nuts. edição de Würth Industrie Service GmbH & Co. https://www.wuerth-industrie.com/web/media/en/pictures/wuerthindustrie/technikportal/dinokapitel/Kapitel_04_DINO_tech Teil.pdf.
- Yang, Leipeng, Shujuan Li, Yan Li, Mingshun Yang e Qilong Yuan. 2019. "Experimental Investigations for Optimizing the Extrusion Parameters on FDM PLA Printed Parts". *Journal of Materials Engineering and Performance* 28, no. 1: 169-82. 10.1007/s11665-018-3784-x. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3784-x>.
- Yu, Q. M. e H. L. Zhou. 2015. "Finite Element Study on Pre-Tightening Process of Threaded Connection and Failure Analysis for Pressure Vessel". *Procedia Engineering* 130: 1385-96. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.307>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815041910>.

ANEXO A: Datasheet PLA



Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

3D Printing Monofilament – General Purpose Grade

Monofilament Applications

Ingeo 4043D can be converted into 3D printer monofilament. This multi-purpose extrusion grade results in 3D printing monofilament with excellent printability characteristics such as precise detail, good adhesion to build plates (no heating needed), less warping or curling, and low odor (no strong, greasy, or oily smell while printing). These properties make this grade well-suited for 3D printing using many different types of printers and for a broad range of printing applications.

Processing Information

Ingeo 4043D biopolymer is available in pellet form. Drying prior to processing is essential. The polymer is stable in the molten state, provided that the extrusion and drying procedures are followed.

Machine Configuration

Ingeo biopolymers will process on conventional extruders using general purpose screws with L/D ratios from 24:1 to 30:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended. Optimization to your specific equipment may require NatureWorks technical support.

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo 4043D is not compatible with a wide variety of resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or high MFR polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo polymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.

Typical Material Properties ⁽¹⁾

Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity, g/cc	1.24	D792
MFR, g/10 min ⁽²⁾	6	D1238
Relative Viscosity ⁽³⁾	4.0	D5225
Clarity	Transparent	-
Peak Melt Temperature, °C	145-160	D3418
Glass Transition Temperature, °C	55-60	D3418
Mechanical Property		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8700 (60)	D882
Tensile Strength at Break, psi (MPa)	7700 (53)	D882
Tensile Modulus, psi (MPa)	524,000 (3.6)	D882
Tensile Elongation, %	6	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength, psi (MPa)	12,000 (83)	D790
Flexural Modulus, psi (MPa)	555,000 (3.8)	D790
Heat Distortion Temperature, °C 66 psi (0.45 MPa)	55	E2092

(1) Typical properties for injection molded amorphous bars; not to be construed as specifications.

(2) 210 °C/2.16 kg

(3) RV measured at 1.0 g/dL in chloroform at 30°C

4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

Drying

In-line drying is required. A moisture content of less than 0.025% (250ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions are 4 hours at 175°F (80°C) or to a dew point of -30°F (-35°C), with an airflow rate greater than 0.5 cfm/lb of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.

Processing Temperature Profile ⁽⁴⁾

Melt Temp.	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temp.	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	390°F	200°C
Screw Speed	20-100 rpm	
Filament Diameter Inspection (on-line)	Essential for quality monofilament (+/- 3% max. deviation)	
3D Printing Temp.	190-230°C	
Print Bed Temp.	None needed. (or 50-70°C if applicable)	

(4) Starting points only, and may need to optimized depending on your system.

ANEXO B: Imagens dos parafusos em diferentes orientações de construção

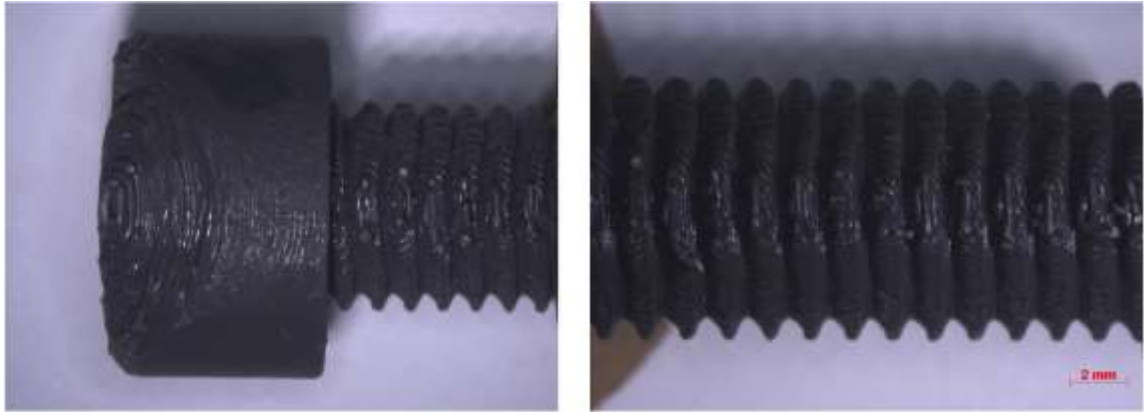


Figura 86 - Vista frontal da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação de 45° em relação ao eixo Z.

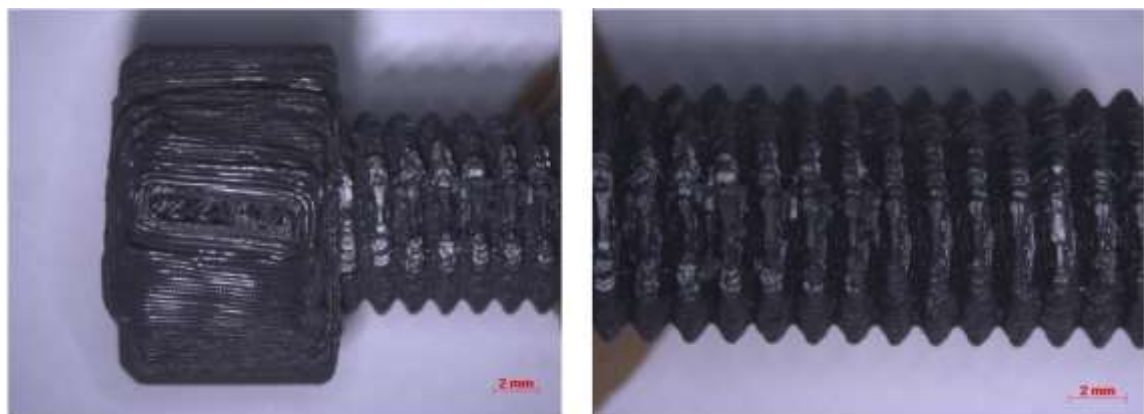


Figura 87 - Vista frontal da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação horizontal.

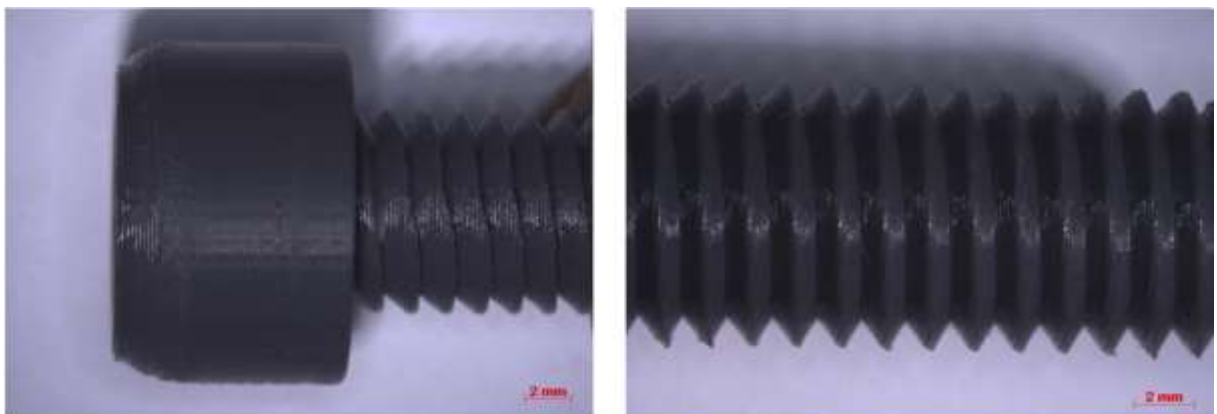


Figura 88 - Vista frontal da cabeça (à esquerda) e rosca (à direita) do parafuso impresso com a orientação vertical.



Figura 89 - Vista total frontal do parafuso impresso com a orientação de 45° em relação ao eixo Z.



Figura 90 - Vista total lateral do parafuso impresso com a orientação de 45° em relação ao eixo Z.



Figura 91 - Vista total frontal do parafuso impresso com a orientação horizontal.



Figura 92 - Vista total lateral do parafuso impresso com a orientação horizontal.



Figura 93 - Vista total frontal do parafuso impresso com a orientação vertical.



Figura 94 - Vista total lateral do parafuso impresso com a orientação vertical.



ANEXO D: Resultados dos ensaios dos parafusos

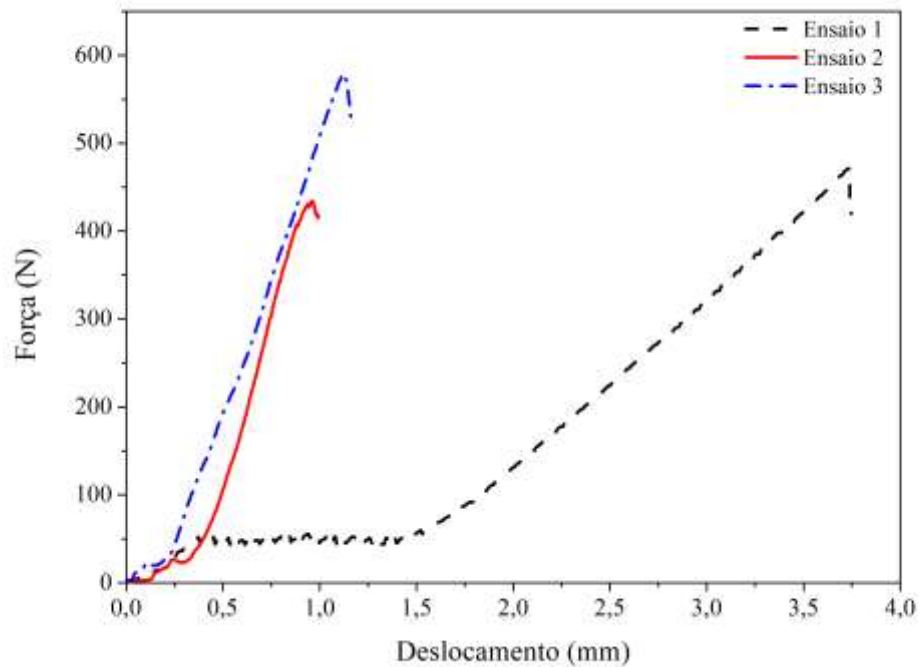


Figura 95 - Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 1.

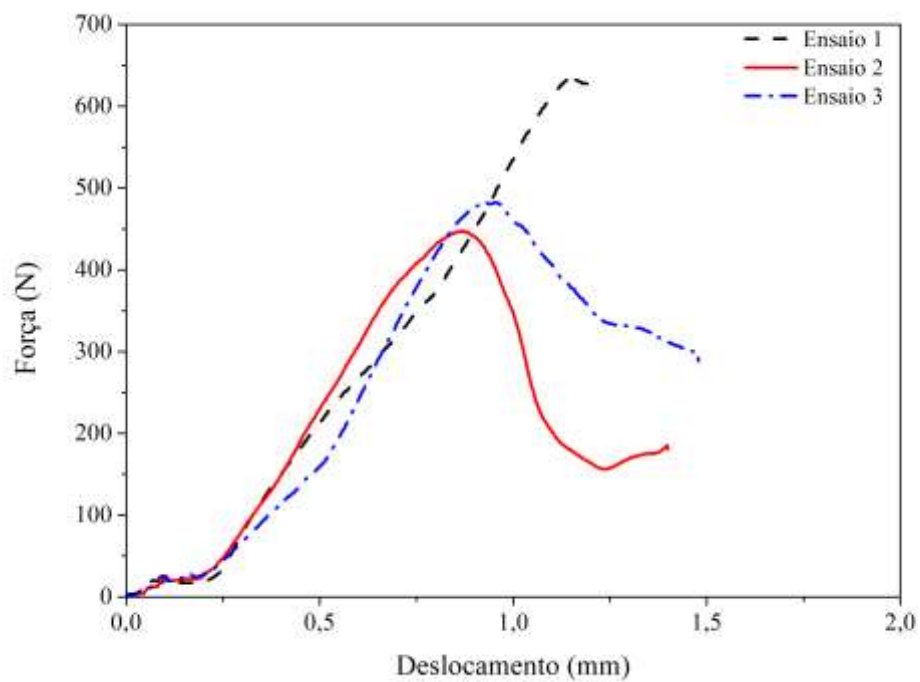


Figura 96- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 2.

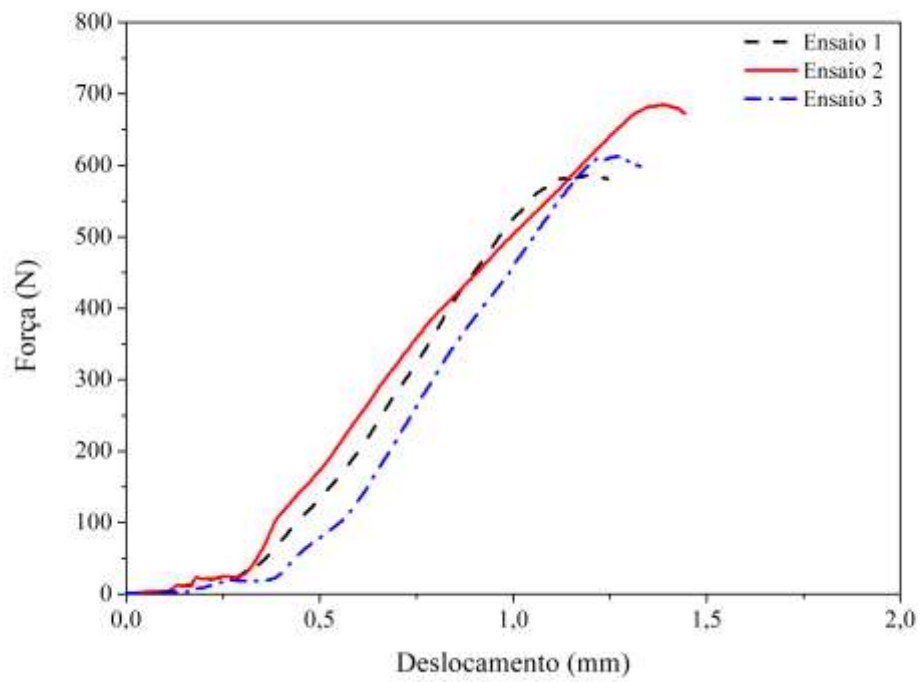


Figura 97- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 3.

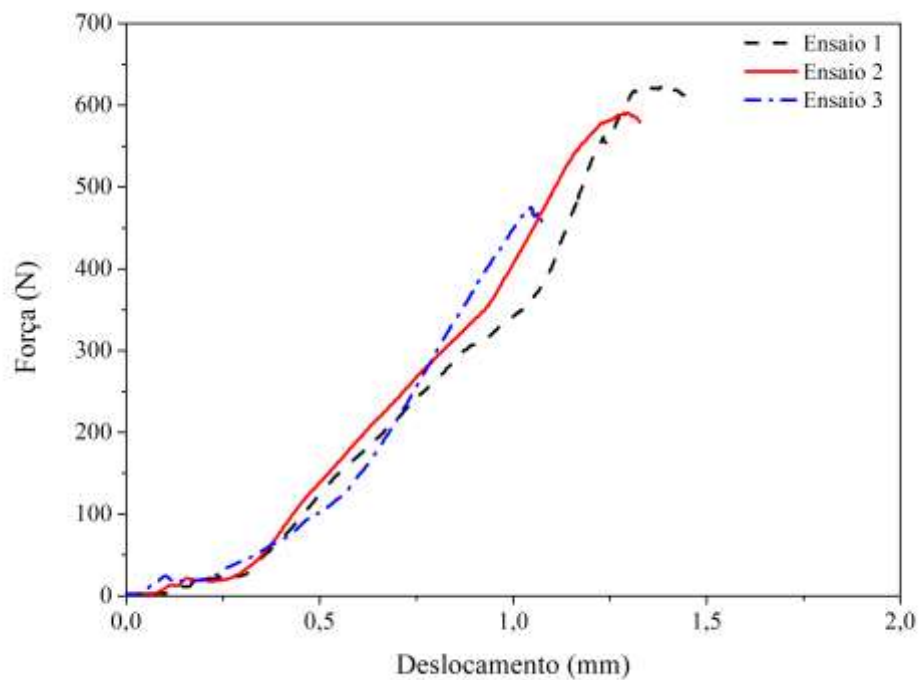


Figura 98- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 4.

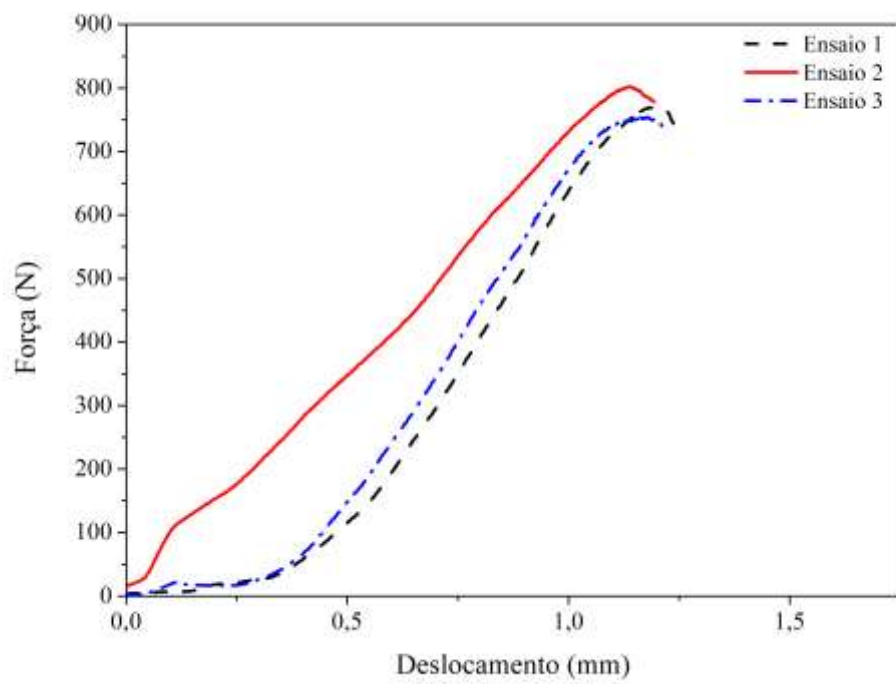


Figura 99- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 5.

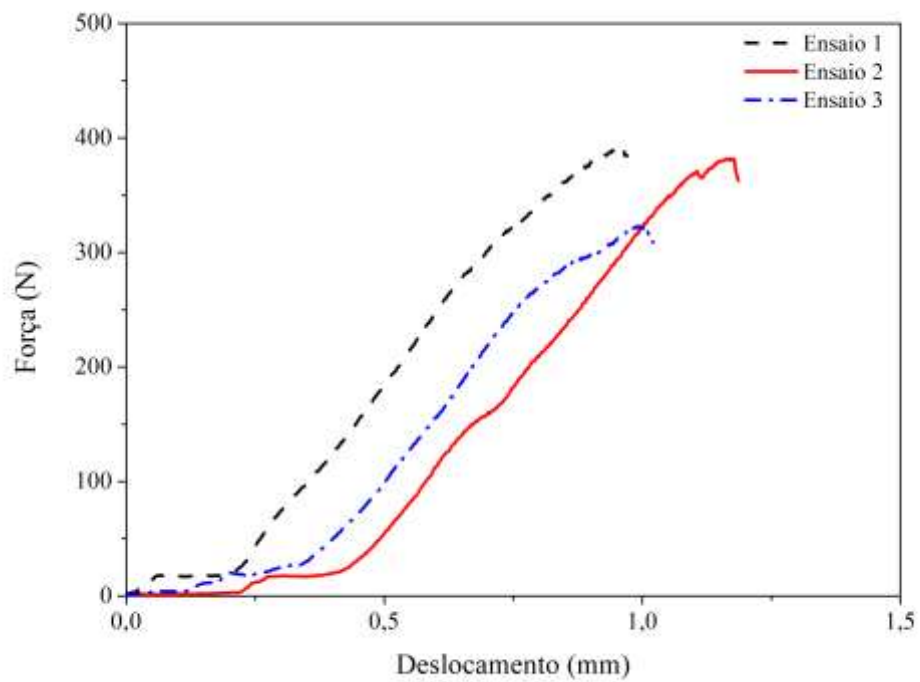


Figura 100- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 6.

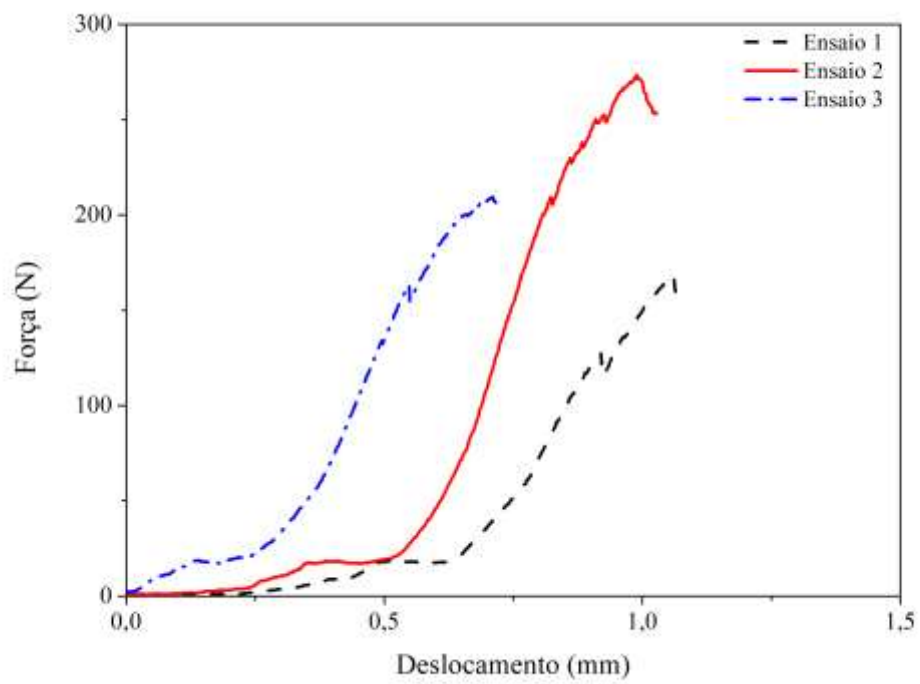


Figura 101- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 7.

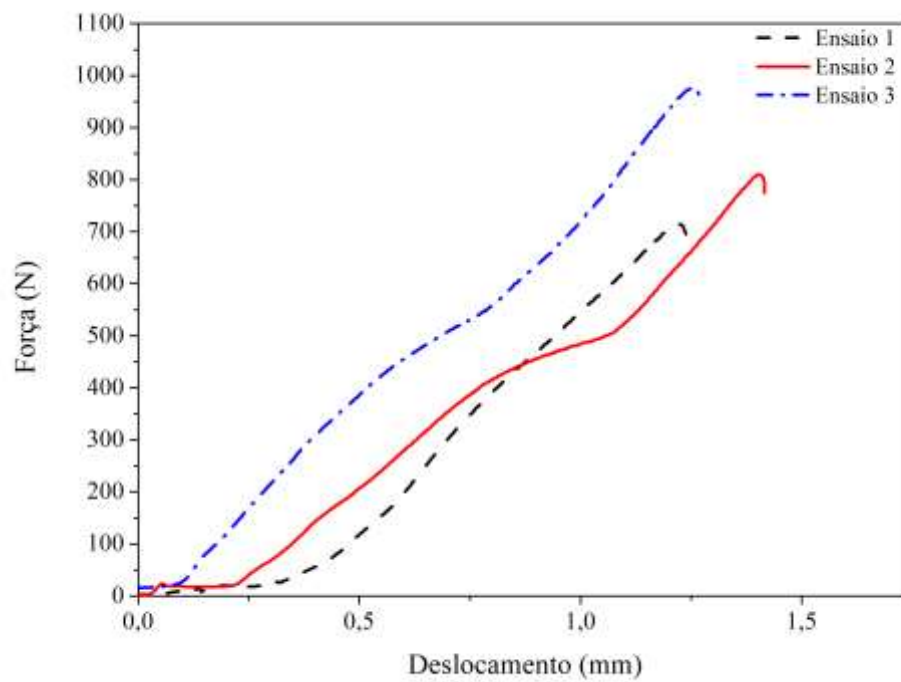


Figura 102- Resultados dos ensaios dos parafusos da condição 8.

ANEXO E: Resultados dos ensaios à tração

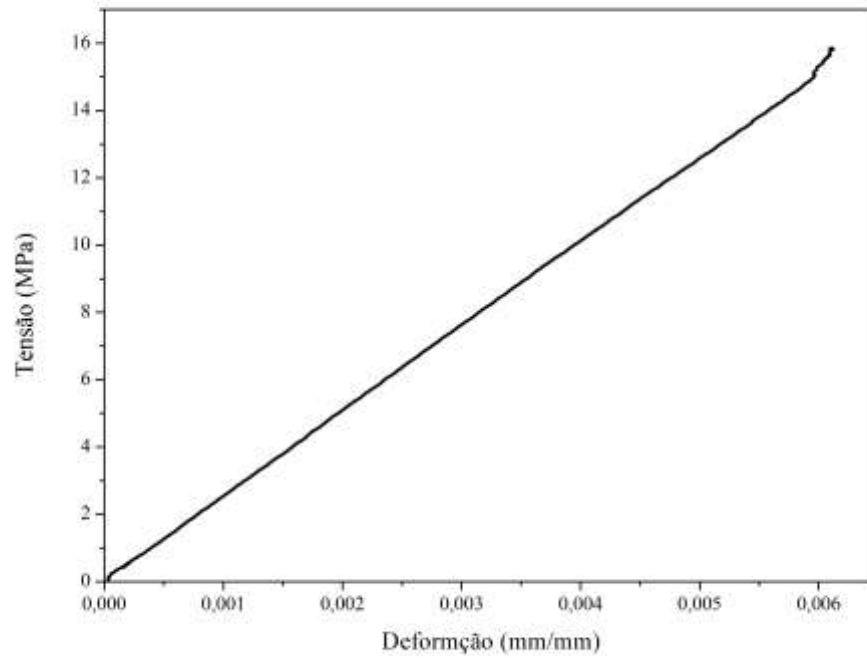


Figura 103 - Ensaio à tração do provete da condição 1

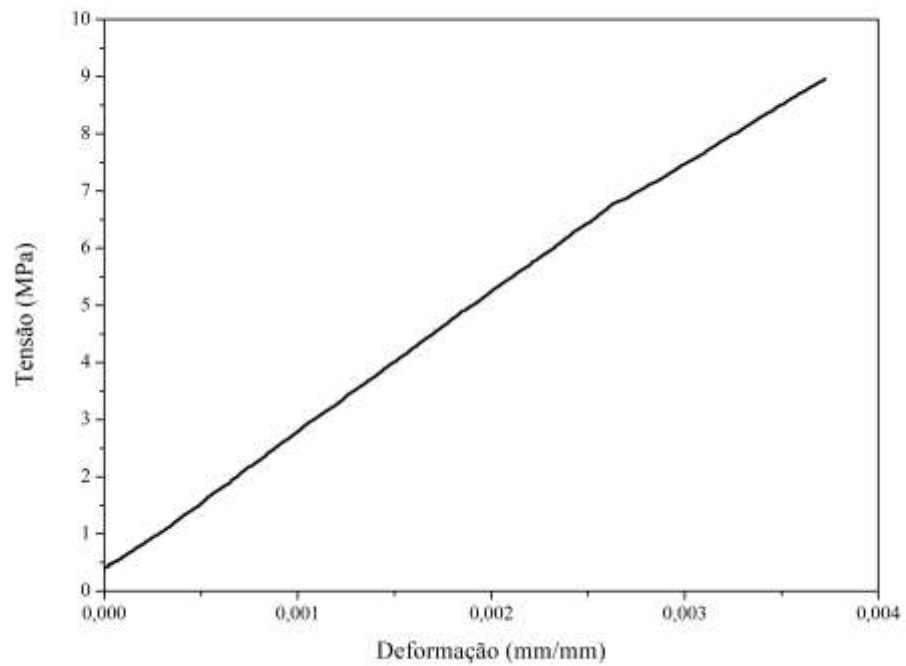


Figura 104 - Ensaio à tração do provete da condição 2

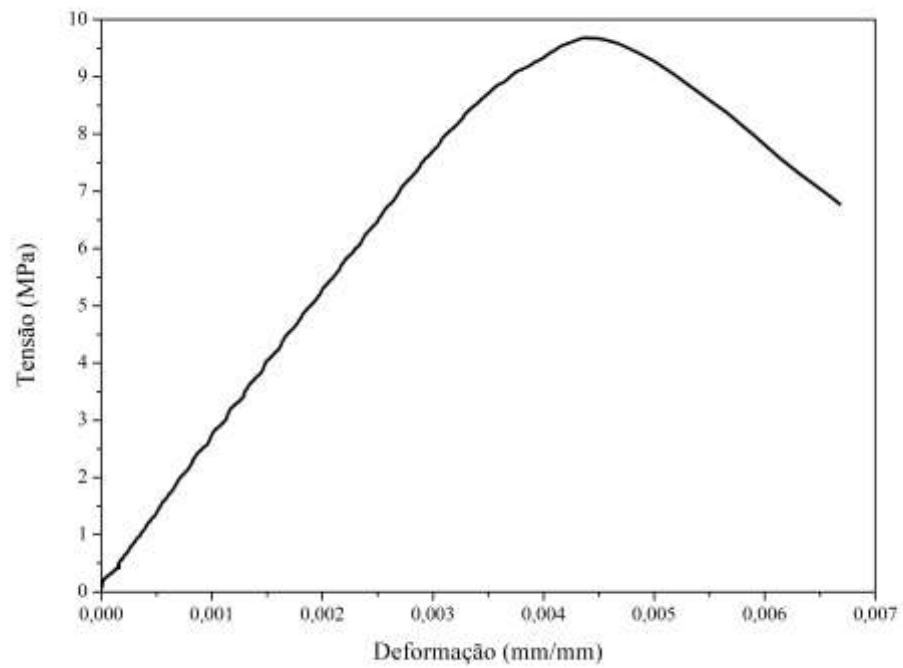


Figura 105 - Ensaio à tração do provete da condição 3

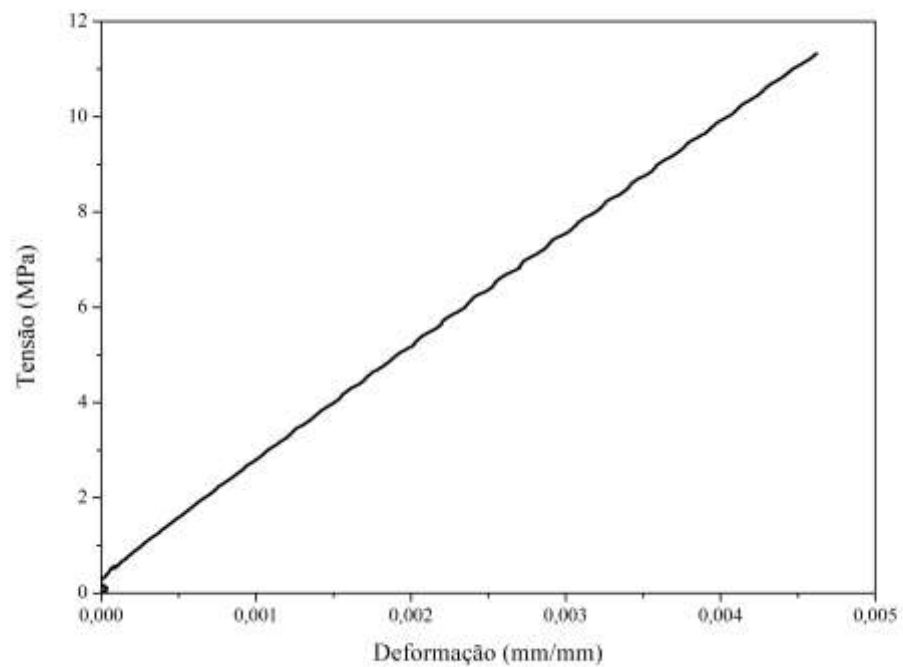


Figura 106 - Ensaio à tração do provete da condição 4

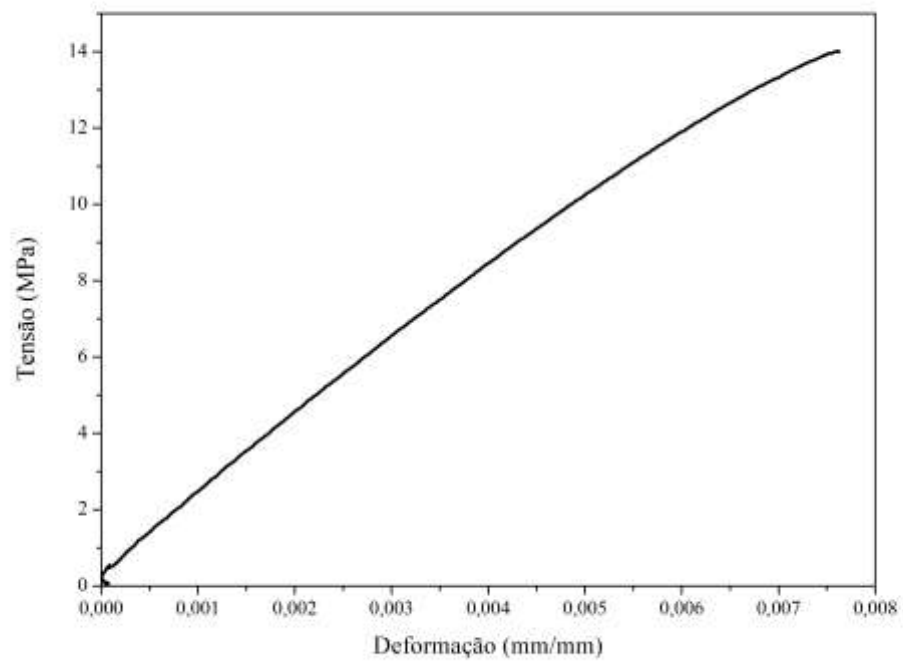


Figura 107 - Ensaio à tração do provete da condição 5

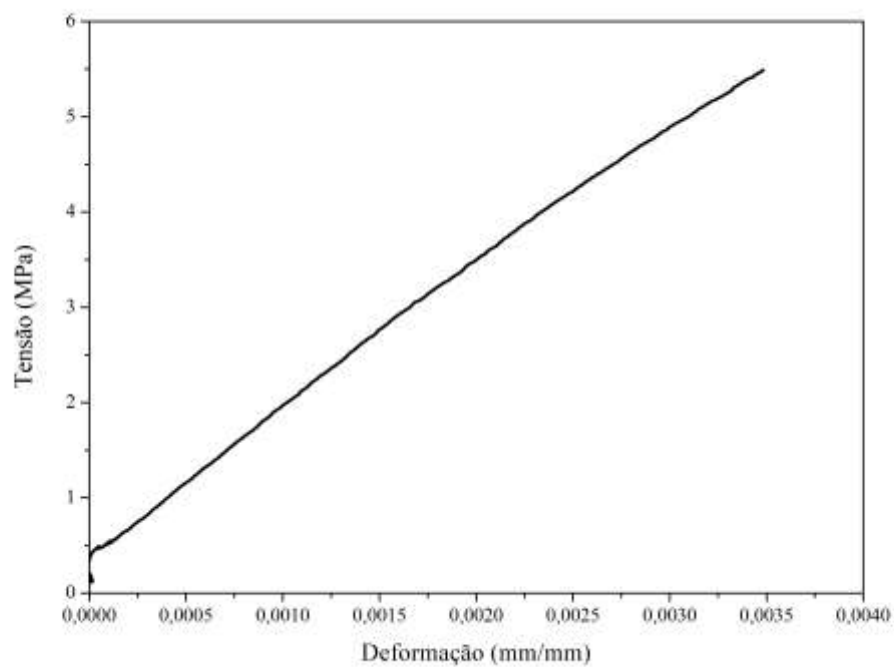


Figura 108 - Ensaio à tração do provete da condição 6

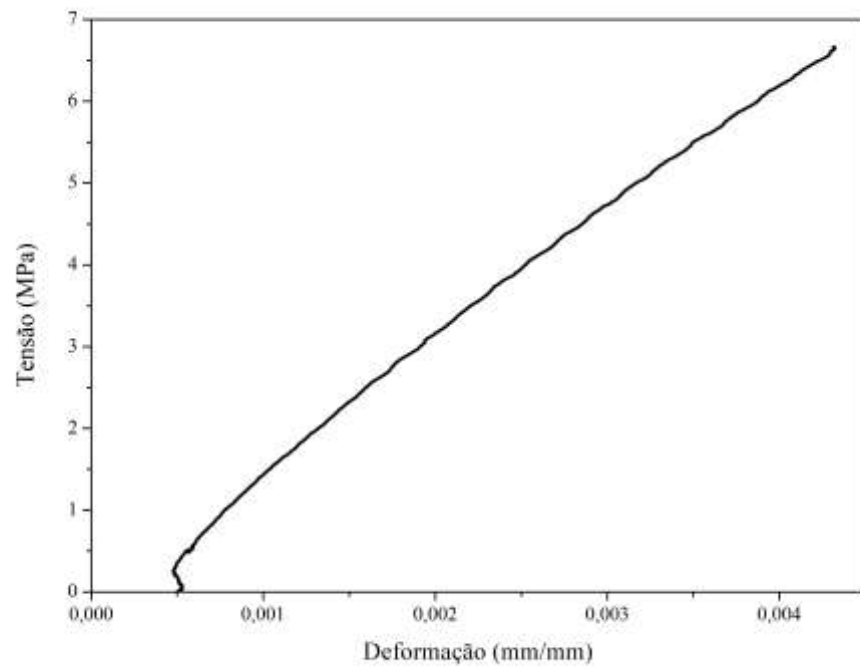


Figura 109 - Ensaio à tração do provete da condição 7

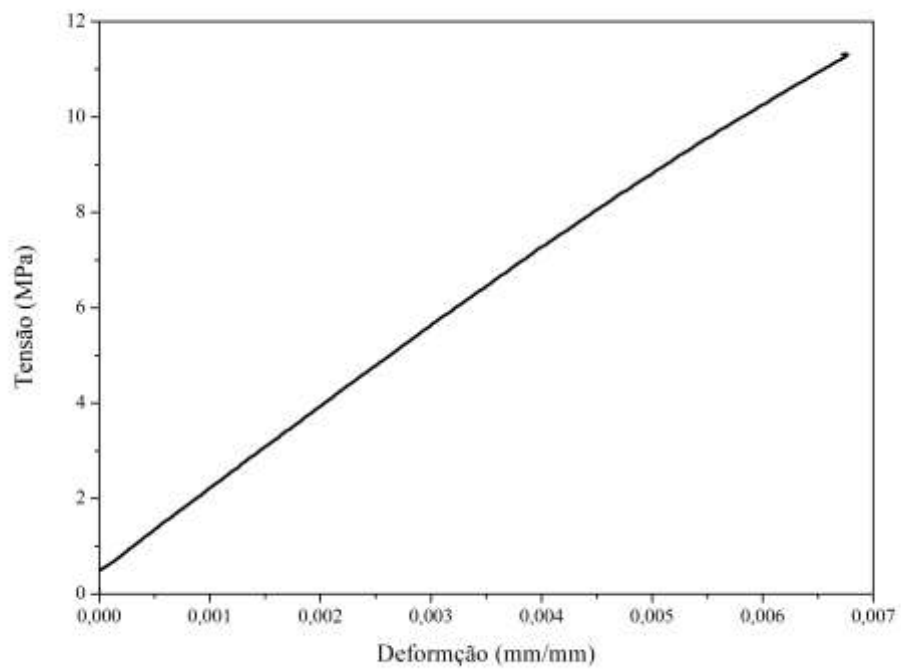


Figura 110 - Ensaio à tração do provete da condição 8

ANEXO F: Superfícies de fratura dos provetes



Figura 111 - Superfície de fratura do provete da condição 1.



Figura 112- Superfície de fratura do provete da condição 2.



Figura 113- Superfície de fratura do provete da condição 3.



Figura 114- Superfície de fratura do provete da condição 4.



Figura 115- Superfície de fratura do provete da condição 5.



Figura 116- Superfície de fratura do provete da condição 6.



Figura 117- Superfície de fratura do provete da condição 7.



Figura 118- Superfície de fratura do provete da condição 8.

ANEXO G: Dispositivo de ensaio ao desgaste

